

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів,
які навчаються за спеціальністю 153 «Мікро та наносистемна техніка»,
спеціалізації «Електронні біомедичні системи і технології» та «Інформаційні
технології проектування в електроніці та наносистемах»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2019

Електронні сенсори: Лабораторний практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 153 «Мікро та наносистемна техніка», спеціалізації «Електронні біомедичні системи і технології» та «Інформаційні технології проектування в електроніці та наносистемах»/ уклад.: О.М. Шмирьова, Т.Ю. Обухова, Т.А. Саурова. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,86 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – с. 50

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 9 від 30.05.2019 р.)
за поданням Вченої ради факультету електроніки (протокол № 04/2019 від 26.04.2019 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Укладачі: *Шмирьова Олександра Миколаївна, д-р техн. наук, проф.
Обухова Тетяна Юріївна, канд. техн. наук, ст. викладач
Саурова Тетяна Асадівна, канд. техн. наук, доцент*

Відповідальний редактор *Тимофєєв В.І., завідувач кафедри електронної інженерії КПІ ім. Ігоря Сікорського, доктор техн. наук, професор*

Рецензент: *Шмирьова Л.М., доцент кафедри електронних приладів та пристроїв КПІ ім. Ігоря Сікорського, канд. техн. наук, доцент*

Відповідно до навчальної програми дисципліни «Електронні сенсори» передбачено виконання лабораторних робіт: «Виготовлення та дослідження тонкоплівкових сенсорів температури», «Виготовлення та дослідження ємнісних сенсорів вологості», «Виготовлення та дослідження властивостей кремнієвих ФЕП», «Дослідження оптоволоконних сенсорів температури». Студенти практично досліджують технологію виготовлення та властивості різних типів сенсорів, принцип дії яких ґрунтується на зміні електрофізичних, електричних та оптичних параметрів матеріалів.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019

Лабораторна робота №1

Виготовлення та дослідження тонкоплівкових датчиків температури

Мета роботи: виготовлення та дослідження тонкоплівкового терморезистивного сенсора температури.

1. Теоретичні відомості

Одним з найважливіших різновидів датчиків є датчики температури, оскільки багато процесів в тому числі і в повсякденному житті регулюються температурою. Окрім того шляхом вимірювання температури можливо опосередковано вимірювати інші параметри.

Розглянемо терморезистивні датчики температури, передавальною функцією яких є залежність електричного опору від температури.

1.1 Металеві терморезистори

Питома електропровідність металів визначається формулою:

$$\sigma = en\mu \quad (1)$$

де e – заряд електрона, n – концентрація носіїв заряду, μ – рухливість носіїв заряду.

В металі зі зміною температури концентрація носіїв заряду залишається незмінною ($n = \text{const}$) і тому температурна залежність σ визначається лише динамічними властивостями носіїв – рухливістю:

$$\mu = \frac{e\tau_p}{m^*}, \quad (2)$$

де τ_p – час релаксації імпульсу, m^* – ефективна маса електрона. На рухливість носіїв заряду впливають процеси розсіювання імпульсу та енергії. В металах основним механізмом розсіювання є фононне розсіювання: на теплових коливаннях кристалічної ґратки. Згідно квантової теорії (статистиці Фермі-Дірака) питомій електропровідності металів відповідає обернена залежність від температури T

$$\sigma \sim T^{-1}, \quad (3)$$

тобто питомий опір металів ρ

$$\rho = 1/\sigma, \quad (4)$$

лінійно залежить від температури

$$\rho \sim T.$$

Металеві терморезистори виготовляють на основі платини, нікелю та міді. Ці метали характеризуються хімічною стійкістю, механічною міцністю, а терморезистори – довготривалою стабільністю передавальної функції $R(T)$.

Електричний опір металевих терморезисторів в широкому діапазоні температур описують рівнянням:

$$R_T = R_0[1 + \alpha(T - T_0)], \quad (5)$$

де R_0 – опір при 0°C (тобто, при 273 K), R_T – електричний опір при температурі T , α – температурний коефіцієнт опору (ТКО)

$$\alpha = \frac{R_T - R_0}{R_0(T - T_0)}, \quad (6)$$

який для платини чисельно складає $3,9 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, для нікелю – $5,39 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, для міді – $4,2 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Передавальна функція металевих терморезисторів наведена на рис. 1.

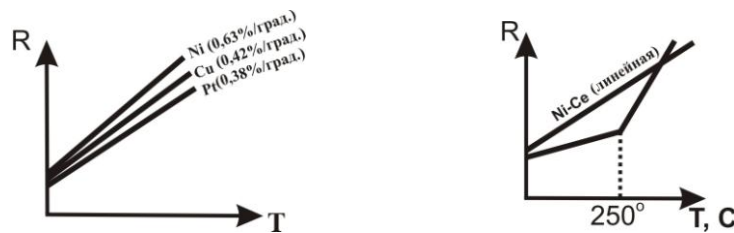


Рис. 1 Передавальна функція металевих терморезисторів.

Слід підкреслити, що для металів $\alpha > 0$.

Згідно міжнародному стандарту виготовляють металеві терморезистори, опір яких при 0°C складає 50 Ом, 100 Ом, 0,5 кОм, 1 кОм. В більшості випадків використовують терморезистори з опором 50 Ом і 100 Ом. Такі вимірювальні резистори позначають відповідно Cu-50, Cu-100, Pt-100, Ni-100.

1.2 Напівпровідникові терморезистори: керамічні та полікристалічні

На відміну від металів, напівпровідники можуть мати як від'ємне, так і додатне значення ТКО.

1.2.1 Терморезистори з від'ємним ТКО

Напівпровідникові терморезистори з від'ємним ТКО – резистори, опір яких зі збільшенням температури зменшується, називають **термісторами**. Значення ТКО для найбільш застосованих напівпровідникових матеріалів (Si, TiO_2 , CeO_2 , ...) таких терморезисторів складає близько $3 \dots 8,2 \text{ K}^{-1}$, що майже на порядок вище, ніж у металевих.

Питома електропровідність напівпровідників описується формулою:

$$\begin{aligned}\sigma(T) &= \sigma_n(T) + \sigma_p(T) = \\ &= e \cdot n(T, N_d) \cdot \mu_n(T, N_d) + \\ &+ e \cdot p(T, N_d) \cdot \mu_p(T, N_d)\end{aligned}\quad (7)$$

де n, p – концентрація рухливих носіїв заряду: електронів і дірок, μ_n, μ_p – їх рухливість, відповідно; N_d – концентрація домішки (донорної, акцепторної).

Для основних механізмів розсіювання – фононного та домішкового – температурна залежність рухливості $\mu(T)$ має протилежний характер, а саме:

$$\mu \sim T^\gamma, \quad (8)$$

де $\gamma = -\frac{3}{2}$ для фононного розсіювання, $\gamma = +\frac{3}{2}$ для домішкового розсіювання.

Вказані чисельні значення γ підтверджені експериментально (у межах похибки визначення) для електронних напівпровідників і тих діркових напівпровідників, у яких незначна різниця ефективних мас важких і легких дірок.

При одночасній дії фононного і домішкового механізмів розсіювання, зважаючи на протилежний характер температурної залежності, слід очікувати максимального значення мобільності при певній температурі T_{\max} . На рис. 1 наведені експериментальні залежності $\mu_n(T)$ для кремнію із різним вмістом фосфору. При концентрації донорів $N_d \leq 10^{24} \text{ м}^{-3}$ (рис.1 криві 1, 2), що відповідає невинродженому електронному газу, рухливість має максимальне значення при температурі $\approx 200 \text{ К}$.

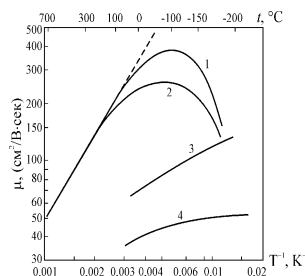


Рис. 1 Експериментальні залежності $\mu_n(T)$ для кремнію з різним дозованим вмістом домішок фосфору: 1- $4,7 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$; 2 – $2,7 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$; 3 - $4,7 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$; 4 – $4,7 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-3}$. Пунктирна лінія відповідає апроксимації, що описується $\mu_n(T) = 1,5 \cdot 10^6 \cdot T^{-3/2} \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{сек}$.

Балістичний ефект домішкового розсіювання – чим більша енергія (швидкість) носіїв заряду, тим більший час релаксації і, відповідно, рухливість – має місце лише для невинродженого напівпровідника. При високих рівнях легування $N_d > 10^{24} \text{ м}^{-3}$ потенціальні поля іонів перекриваються, утворюється домішкова зона, що об'єднана із зоною провідності, електронний газ стає винродженим. У межах домішкової зони час іонної релаксації від енергії не залежить, але N_d продовжує впливати на середнє значення рухливості, а температурну залежність рухливості зумовлює фононне розсіювання.

При температурах вище 250 К фононний механізм розсіювання стає домінуючим для температурної залежності рухливості. При цьому залежність

концентрації основних носіїв заряду n (для донорного напівпровідника) від температури має наступний вигляд:

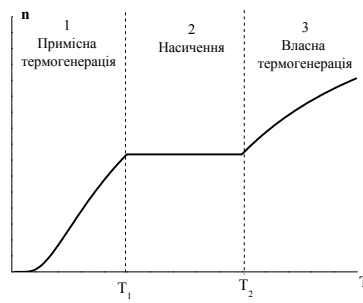


Рис. 2 Залежність концентрації основних носіїв заряду від температури в донорному напівпровіднику: 1 – область домішкової термогенерації, 2 – область насичення, 3 – область власної термогенерації.

Експериментальна залежність $\rho(T, N_d)$ подана на рис. 3 у координатах $\ln \rho = f(\frac{1}{T})$.

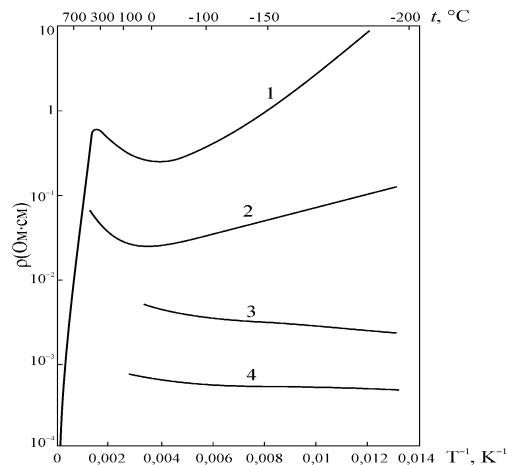


Рис. 3 Температурні залежності питомого опору для кремнію з різним дозованим вмістом домішки N_d фосфору: 1- $4,7 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$; 2 – $2,7 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$; 3 – $4,7 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$; 4 – $4,7 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-3}$.

Питомий опір невиродженого напівпровідника ($N_d < 10^{24} \text{ м}^{-3}$) зменшується при збільшенні температури, але не монотонно (рис. 3, криві 1, 2). У діапазоні температур області насичення концентрації носіїв заряду ($n = N_d$) залежність $\rho(T)$ визначається залежністю $\mu(T)$ і проходить через мінімум при температурах 100...200 К. При кімнатній температурі (близько 300К) у більшості напівпровідників питомий опір зростає при збільшенні температури внаслідок посилення фононного механізму розсіювання.

Питомий опір виродженого напівпровідника ($N_d > 10^{24} \text{ м}^{-3}$) монотонно зростає в усьому діапазоні температур починаючи від $T \geq 0$.

Кремнієві датчики температури

Для вимірювання температури найчастіше застосовують кремнієві терморезистори, що пояснюється їх суттєво низькою собівартістю і високою температурною чутливістю (ТКО). Недоліками кремнієвих датчиків є вузький діапазон вимірювальних температур і нелінійність передавальної функції $R(T)$. Однак для певних застосувань ці недоліки мають другорядне значення.

Характеристика кремнієвого датчика температури досить точно відповідає наступному квадратичному рівнянню:

$$R(T) = R_{25}[1 + \alpha\Delta T + \beta(\Delta T)^2], \quad (9)$$

де R_{25} – опір при еталонній температурі $T_h = 25^\circ\text{C}$; ΔT – різниця температур ($\Delta T = T - T_h$); α , β – температурні коефіцієнти з типовими для кремнію значеннями $7,8 \cdot 10^{-3}^\circ\text{C}^{-1}$ та $1,84 \cdot 10^{-5}^\circ\text{C}^{-2}$, відповідно.

Для підвищення точності вимірювань за допомогою кремнієвого датчика температури необхідно лінеаризувати його передавальну характеристику. Найпростіше цього досягають в схемі живлення постійним струмом включенням паралельно до кремнієвого терморезистора R_{Th} додаткового резистора R_L , опір якого не залежить від температури. При живленні джерелом постійної напруги для лінеаризації $R(T)$ резистор R_L з'єднують з датчиком температури R_{Th} послідовно (рис. 4).

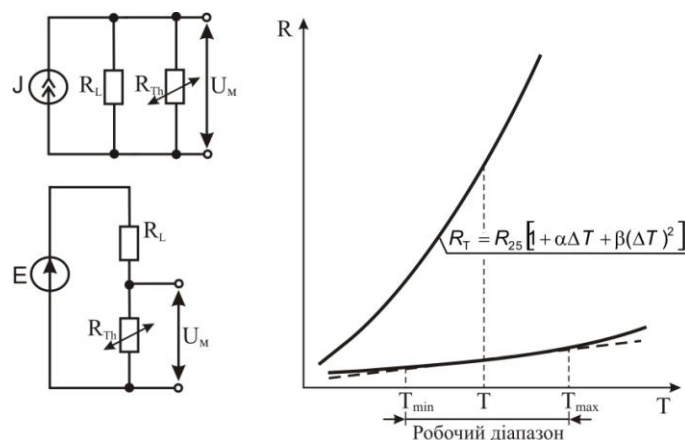


Рис. 4 Схема лінеаризації характеристики кремнієвого датчика в діапазоні вимірювання ($T_{\min} < T_p < T_{\max}$).

Вимірювана напруга U_m визначається співвідношенням:

$$U_m = I \cdot R_L \cdot \frac{R_{Th}}{R_L + R_{Th}} \quad \text{при } I = \text{const} \quad (10)$$

$$U_m = U \cdot \frac{R_{Th}}{R_L + R_{Th}} \quad \text{при } U = \text{const} \quad (11)$$

В результаті перетворення рівнянь (10), (11) отримують формулу розрахунку опору R_L :

$$R_L = R_{25} \left[\left(\frac{\alpha^2}{\beta} - 1 \right) + 3\Delta T_p (\alpha + \beta \Delta T_p) \right], \quad (12)$$

де $\Delta T_p = T_p - T_h$, $T_h = 25^\circ\text{C}$. Таким чином, опір R_L залежить від вибору робочої температури T_p . В схемах з джерелом постійного струму та постійної напруги величина опору R_L однакова.

Керамічні та полікристалічні терморезистори

Термістори складаються з полікристалічної суміші різних спечених оксидів, наприклад Fe_2O_3 (шпинель), Zn_2TiO_4 , MgCr_2O_4 , TiO_2 , NiO и CoO с Li_2O . Процес спікання відбувається при $1000\ldots 1400^\circ\text{C}$. Після цього шляхом впікання срібної пасти утворюються контакти. Для забезпечення високої стабільності опору, перш за все при довготривалих вимірюваннях, термістори після спікання піддають процесу штучного старіння, використовуючи спеціальні режими обробки і експлуатації.

Температурну характеристику термістора описують рівнянням:

$$R_T = R_N \cdot e^{B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_N} \right)}, \quad (13)$$

де R_T та R_N – опір при температурах T та T_N (в градусах Кельвіна), відповідно; B – константа матеріалу терморезистора (розмірність: Кельвін). ТКО термістора визначається співвідношенням

$$\alpha_R = -\frac{B}{T^2}. \quad (14)$$

Температурна характеристика термістора при різних значеннях константи матеріалу B наведена на рис. 5.

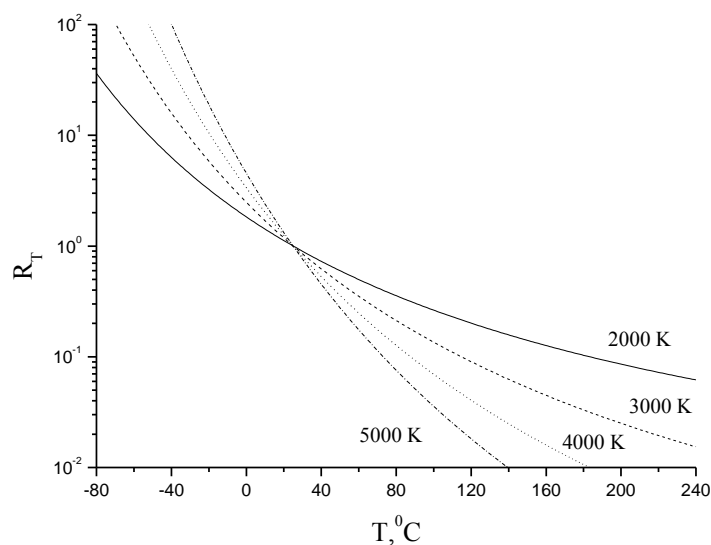


Рис. 5 Передавальна функція композитних оксидних термісторів при різних значеннях константи матеріалу B .

1.1.2 Терморезистори з додатнім ТКО

Терморезистор з додатнім ТКО називають *позистором*. В певних областях температур дуже високий додатній ТКО мають резистори, що виготовлені з легованої титанатної кераміки. Це обумовлено взаємодією напівпровідникових і сегнетоелектричних властивостей титанатної кераміки, яку виготовляють з суміші карбонату барію з оксидами стронцію і титану шляхом пресування, формуючи диски або стержні. Матеріал спікають шляхом відпалювання заготовки при температурі в діапазоні 1000...1400°C з наступним створенням контактів. Змінюючи склад суміші можна варіювати електричні властивості позистора.

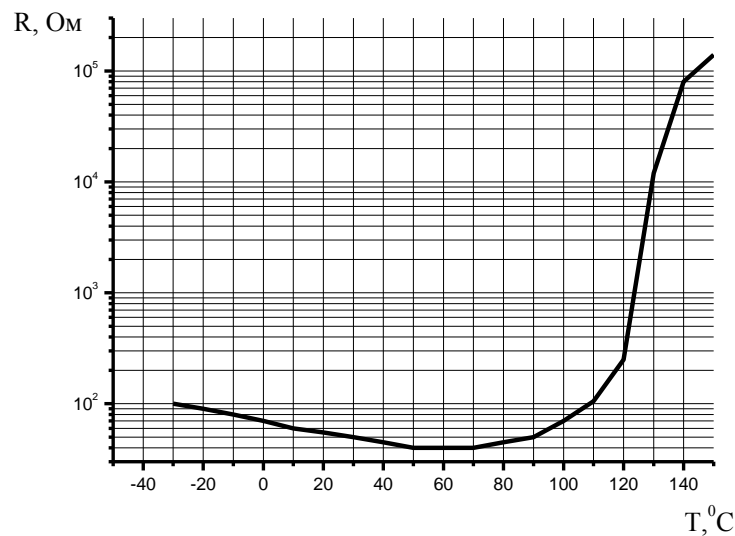


Рис. 6 Передавальна функція позистора, що виготовлений з сегнетоелектрика.

На передавальній функції – температурній залежності опору (рис. 6) – спостерігається різке зростання опору при температурі вище 110°C .

2. Вимірювальні схеми

Для вимірювання температури датчик необхідно підключити до вимірювальної схеми, на виході якої формується напруга, що пропорційна температурі. Найпростішою є мостова схема – міст Уїтстона (рис. 7), перевагою якого є висока чутливість та незалежність результатів вимірювань від напруги джерела живлення.

До вимірювання температури міст Уїтстона балансують за допомогою резистора R_v , опір якого встановлюють таким, що призводить до відсутності (нульове значення) показань вимірювального приладу V (вольтметра). Оскільки опори резисторів R_1 та R_2 однакові, умовою балансування є $R_v = R_T$.

Вимірювання температури здійснюють за градуовальною (калібрувальною) характеристикою, яка встановлює її відповідність показанням вимірювального приладу.

В разі вимірювання напруги $U=f(T)$, яка буде визначатися співвідношенням

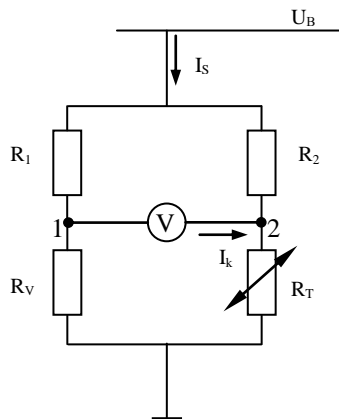


Рис. 7. Схема вимірювання (міст Уїтстона) температури.

$$U_M = \left[\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_v}{R_v + R_T} \right], \quad (15)$$

треба використовувати високоомний вольтметр (для забезпечення відсутності протікання струму між вузлами його включення).

При використанні низькоомного амперметра вимірюється струм короткого замикання

$$I_K = I_S \left[\frac{R_1 R_T}{R_1 + R_v} - \frac{R_2 R_v}{R_2 + R_T} \right], \quad (16)$$

де I_s – струм джерела живлення. Вимірювальний струм I_K повинен бути дуже малим, щоб не викликати нагрівання резистора R_T , яке може призвести до похибок у вимірюванні.

В якості R_T можна застосовувати будь-які промислові вимірювальні резистори типу Pt-100. Найдешевші датчики типу Pt-100 виготовляються в тонкоплівковому виконанні. Вони складаються з тонкої (0.6 мм) керамічної основи на яку методом катодного ВЧ напилення утворюється шар платини товщиною близько 2 мкм. В напиленому шарі лазером випалюють орнамент в формі меандру, проводять тонке доведення номіналу опору терморезистора та виготовляють контактні виводи методом термокомпресійної зварки. Для захисту активного платинового шару його вкривають керамічним ізолюючим шаром товщиною 10 мкм.

3. Технологія виготовлення тонкоплівкових датчиків температури

Технологічний маршрут. Процес фотолітографії

В літографічних процесах на поверхні підкладки формують шар резистивного, стійкого до наступних технологічних агресивних взаємодій матеріалу, який під впливом опромінення визначеної довжини хвилі незворотно змінює свої властивості, втративши стійкість до спеціальних сумішей – проявників. Цей резистивний шар локально опромінюють за допомогою шаблону. В залежності від довжини хвилі застосованого опромінення розрізняють оптичну, рентгенівську та електронну літографію (рис. 8).

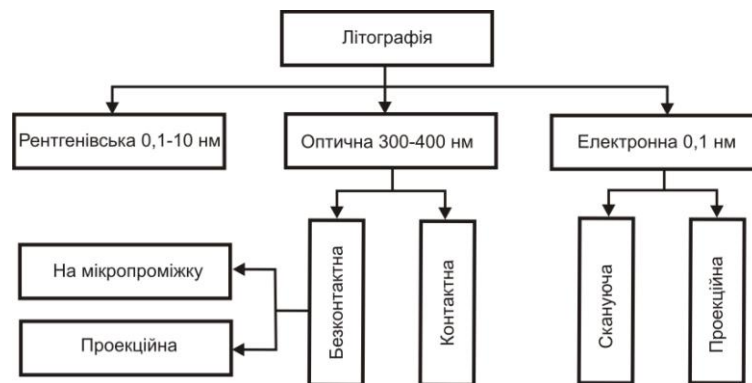


Рис. 8 Класифікація методів літографії.

Оптична літографія (фотолітографія) відповідно зі способом отримання (експонування) може бути контактною або безконтактною (фотолітографія на мікропроміжку та проекційна фотолітографія, відповідно).

В виробництві сучасних мікросхем фотолітографія – самий універсальний технологічний процес. Вона дозволяє з великою точністю та повторюваністю виконувати складні рисунки з розмірами елементів до одиниць мікрону на різноманітних матеріалах.

За допомогою фотолітографії виготовляють фотошаблони – інструменти для виробництва самого процесу фотолітографії.

Основою процесу фотолітографії є фотохімічні реакції, котрі йдуть у світлочутливих матеріалах (фоторезистах) під дією опромінення, до якого матеріал фоторезистивного шару є чутливим та котре викликає необхідні зміни властивостей матеріалу.

Фотохімічні реакції підлягають наступним основним законам:

- закон Грогуса-Дреппера визначає, що будь-яка фотохімічна зміна може призвести тільки поглинання опромінення;
- закон Ейнштейна-Штарка визначає, що поглинений квант світла спроможний активізувати тільки одну молекулу.

Можливість реального протікання фотохімічної реакції залежить від енергії збудження молекул. В полімерах енергія зв'язку молекул лежить в межах 40 – 100 ккал/моль, що відповідає ультрафіолетовій області спектру.

Кожний поглинений квант в залежності від його енергії переходить в електронно-збуджений стан або розриває на вільні радикали тільки одну вільну молекулу в фоторезистивному шарі.

Локальні області зруйнованого фоторезисту, котрі формуються при опроміненні, на відміну від неопромінених областей стають гідрофільними та легко виводяться в проявниках з лужними властивостями.

Фоторезисти представляють собою складні полімерні композиції, в складі котрих є фоточутливі та плівкоформуючі компоненти, розчинники та спеціальні добавки. Останні вводяться для покращення умов плівкоутворення (розріджувачі), для зміни фоточутливості (сенсibilізатори), для покращення адгезії фоторезистивного шару до підкладок, стійкості до дії кислот, лугів, високих температур тощо.

Розчинники визначають стабільність властивостей фоторезистів, впливають на процес нанесення та послідовне висихання фоторезистивного шару.

Тип фоторезисту вибирають в залежності від конкретного використання. Позитивний фоторезист дозволяє отримати менші розміри елементів та більш чіткі межі рисунку. Негативні фоторезисти більш стійкі в процесах, пов'язаних з електролітичним осадженням металів та з глибоким травленням. Фоточутливість характеризує здібність фоторезисту незворотно змінювати свою стійкість до проявника під дією опромінення.

Реакції, що йдуть на темновій стадії, призводять до структурування (зшивки), або, навпаки, до деструкції (руйнування) молекулярних ланцюжків полімеру. В результаті цього стійкість опромінених областей фоторезистивного шару до дії проявника збільшується, або, навпаки, зменшується. Фоторезисти, локальні області яких після дії опромінення за рахунок фотодеструкції виводяться в проявниках, а неопромінені – залишаються на підкладці та формують фоторезистивну контактну маску, називаються **позитивними** (рис. 9.а)

Фоторезисти, локальні області яких під дією опромінення в результаті фотоструктурування робляться стійкими до дії проявника та на відміну від неопромінених залишаються на підкладці, називаються **негативними** (рис. 9.б).

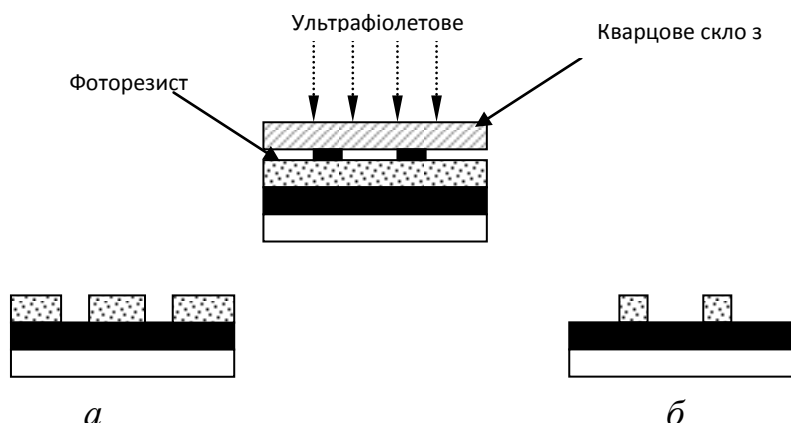


Рис. 9. Формування топології малюнку в випадку позитивного (а) та негативного (б) фоторезистів.

Принциповим фізичним фактором, який обмежує роздільну здатність оптичних систем експонування, є ефекти дифракції світла. Дифракція призводить до формування ореолів на краях ліній та втраті різкості зображення. Теоретично можливо досягнути мінімальної ширини лінії L_{\min} малюнку в залежності від довжини хвилі λ опромінення, яке використовується для експонування. Відповідно до критерію Релея L_{\min} розраховується :

$$L_{\min} = \frac{0,61 \cdot \lambda}{n \cdot \sin(\varphi/2)}, \quad (17)$$

де n – показник заломлення середовища між об'єктивом та зображенням; φ – апертурний кут виходу (кут між крайніми променями кінцевого пучку світла, який виходить із зіниці об'єктиву в сторону зображення). В реальних випадках $n=1$; $\sin(\varphi/2)=0,495$; для $\lambda=400$ нм; $L_{\min}=0,26$ мкм та для $\lambda=300$ нм; $L_{\min}=0,2$ мкм. Це теоретичне обмеження оптичної літографії. На практиці воно не досягається з ряду причин: об'єктиви мають суттєві аберації (скривлення зображень), малюнки топологічних шарів мікросхем представляють собою складні поєднання елементів, дифракційні картини яких можуть частково накладатись одна на одну, і в самому фотолітографічному процесі привносяться дефекти.

Фоточутливість оцінюють величиною S , яка зворотно пропорційна експозиції H , та якої достатньо для структурування або деструкції на всю товщину фоторезисту та відповідної максимальної швидкості проявлення зображення:

$$S = \frac{1}{H} = \frac{1}{E \cdot t}, \quad (18)$$

де E – опроміненість, t – час експозиції.

Фоточутливість визначає продуктивність процесу фотолітографії. В залежності від дії довжини хвилі опромінення, яке поглинається даним фоторезистом, відрізняють інтегральну та спектральну фоточутливість. Роздільна здатність фоторезисту – максимальне число ліній однакової ширини, які розділені проміжками, рівними по ширині лінії, та яке можна отримати в фоторезистивному шарі на довжині 1 мкм після проявлення малюнку:

$$R = \frac{1000}{2L}, \quad (19)$$

де L – ширина реально переданої лінії.

Стійкість до дії агресивних факторів визначається стійкістю самого фоторезисту, однорідністю та бездефектністю нанесеного фоторезистивного шару. Поверхнєве натягнення фоторезисту визначає змочування ним поверхні підкладки та суттєво впливає на адгезійний зв'язок фоторезистивного шару з підкладкою.

У зв'язку з удосконаленням технології отримання конфігурації елементів інтегральних мікросхем, застосовують методи літографії, які використовують для експонування опромінення, яке має меншу довжину хвилі порівняно з ультрафіолетовим випромінюванням.

Основу методу **рентгенівської** літографії складає взаємодія рентгенівського опромінення з рентгенорезистами, яка призводить до зміни їх властивостей в сторону зменшення або збільшення стійкості до проявників. Для рентгенівської літографії використовують характеристичне опромінення з довжиною хвилі 0,1-10 нм. Рентгенівські промені поглинаються цілими молекулами, та при цьому відбувається вибивання електронів з внутрішніх оболонок атомів рентгенорезисту. Електрони, які стали вільними, взаємодіють з полімером та відіграють переважну роль в хімічних перетвореннях руйнування або зшивання молекул. Порядок технологічних операцій отримання зображення той же, що й для звичайної **контактної** літографії (рис. 10).

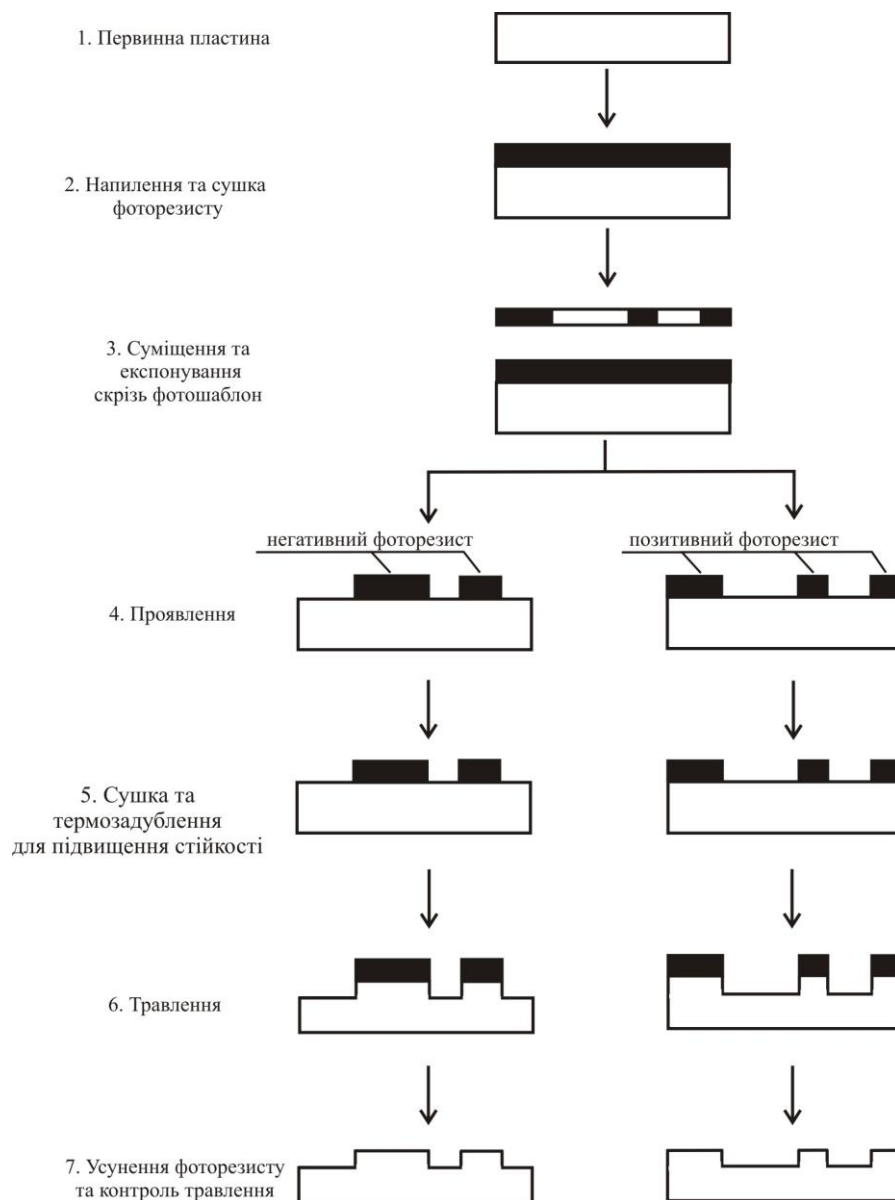


Рис. 10 Послідовність процесу фотолітографії.

Електрона літографія, незважаючи на складність обладнання у порівнянні з оптичним та рентгенівським, є легко автоматизованим технологічним процесом. Електронно-променеве експонування виконується в вакуумних установках та засновано на нетермічній взаємодії електронів з електронорезистом. Електронне бомбардування викликає збудження та іонізацію молекул електронорезисту.

Структурування або деструкція відбудуться повністю, якщо енергія падаючих електронів буде достатньою, для того щоб величина їх вільного пробігу перевищила товщину шару електронорезисту. Для електронно-променевого експонування застосовують установки з прискорюючою напругою 10 – 100 кВ, що відповідає довжині хвилі електронів 100 – 50 нм. На практиці за допомогою електронолітографії отримані зображення з розмірами елементів 0.1 – 0.2 мкм.

На цей час застосовуються два методи електронної літографії:

- обробка сфокусованим одиничним променем (скануюча електронна літографія);
- електронна проекція всього зображення (проекційна електронна літографія).

4. Порядок виконання лабораторної роботи

4.1 Конструкція планарного датчика температури

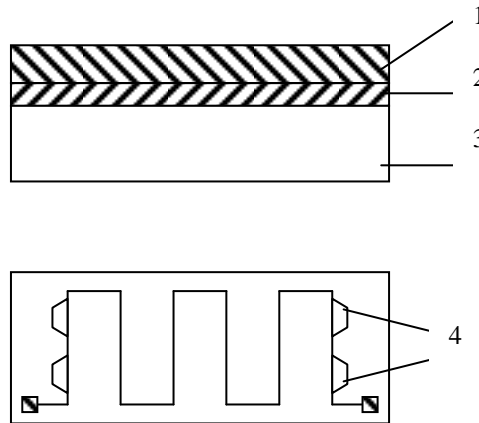


Рис.11 Схематична структура датчика температури: 1 – тонка плівка Ni; 2 – адгезійний шар Ti; 3 – підкладка Al_2O_3 (сітал); 4 – бокові елементи, які служать для прецизійної підгонки номіналу.

4.2 Прилади й устаткування

1. Установка суміщення та експонування.
2. Центрифуга для нанесення фоторезисту.
3. Установка сушки.
4. Термошафи.
5. Фотошаблони.
6. Фоторезист, розчини для прояву, травлення, зняття фоторезисту.
7. Джерело живлення Б5-47.
8. Цифровий омметр.
9. Термостат.

4.3 Технологічний маршрут виготовлення тонкоплівкового металевого терморезистора

1. *Нанесення плівки Ti-Ni* виконується методом вакуумного електронно-променевого випаровування.

2. *Фотолітографія*. Весь процес фотолітографії можна поділити на 3 основних етапи:

- формування на поверхні пластини фоторезистивного шару;
- формування фоторезистивної контактної маски;
- отримання елементів за допомогою резистивної маски.

На центрифугі на металізовану поверхню наносять фоторезист (оптимальна товщина фоторезистивного шару складає 0,5...1,5 мкм). Після цього виконують ІЧ-сушку пластини при температурі $T=60^\circ\text{C}$ протягом 4-5 хвилин. Під час сушки прибирається розчинник і в плівці фоторезисту

відбувається складний релаксаційний процес щільної упаковки молекул, який зменшує внутрішнє напруження і збільшує адгезію сформованого щільного фоторезистивного шару до пластини.

Далі проводять суміщення і експонування за допомогою установки експонування і відповідного фотошаблону. Після цього виконується процес проявлення – видалення зайвих в фоторезистивному шарі частин відповідно до локального освітлення під час експонування. Проявлення проводять у водних розчинах лугу (0.3.. 0.5 % KOH, 1...2 % Na₃PO₄).

Після проявлення пластину промивають, сушать на центрифугі і виконують процес термообробки – задублювання (друга сушка). Задублювання фоторезистивного шару виконується для відновлення набряклого малюнку та надання стійкості фоторезистивній масці від подальших агресивних впливів. Цей процес продовжується 15-30 хв. при $T=140^{\circ}\text{C}$ - 150°C .

3.Контроль зображення. Після термообробки проводиться контроль отриманого зображення за допомогою мікроскопу.

4.Травлення півки металу. Травлення півки Ti-Ni відбувається в кислотних травниках враховуючи всі вимоги техніки безпеки при роботі з хімічними речовинами (працювати тільки під працюючою витяжкою в халаті та рукавичках). Після травлення промивають пластину в воді і виконують сушку на центрифугі.

5. Скрайбування Для розділення отриманої пластини на окремі сенсори застосовується алмазний скрайбер з двопротиневим позиціонуванням.

6. Пайка контактів виконується за допомогою флюсу на основі соляної кислоти та низькотемпературного припою.

7. Перевірка опору Після припаювання контактів номінал отриманого сенсора перевіряється за допомогою омметра.

4.4 Порядок виконання вимірювань

1. Помістити виготовлені та тестові терморезистори в термостат і підключити виводи до вимірювального приладу згідно схеми вимірювання (рис. 12).

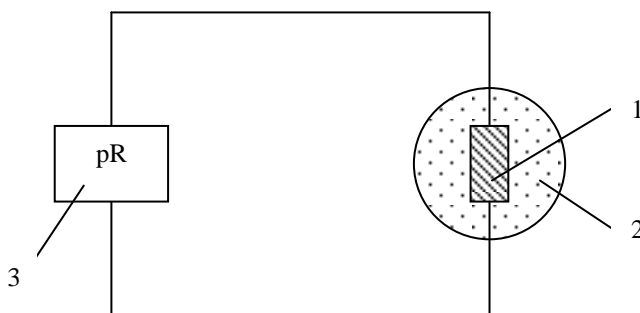


Рис.12. Схема вимірювання передавальної функції датчика температури:
1 – датчик температури; 2 – термостат; 3 – цифровий омметр.

2. Включити термостат і виміряти залежність опору від температури.

Діапазон вимірювання та крок задається викладачем.

4.5 Обробка результатів

1. Побудувати залежності опору датчиків від температури, застосовуючи при потребі лінійну апроксимацію.
2. Визначити температурний коефіцієнт опору:

$$TKO = \frac{R_{T_2} - R_{T_1}}{R_{T_1} (T_2 - T_1)} 100\%, \left[\frac{\%}{^{\circ}C} \right] \quad (17)$$

3. Написати висновки по роботі.

4.6 Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Схема вимірювання.
3. Порядок виконання роботи.
4. Експериментальні результати в табличному та графічному вигляді.
5. Результати обробки експерименту.
6. Висновки.

4.7 Контрольні питання

1. Види терморезисторів.
2. Природа зміни опору від температури в металах.
3. Механізми розсіювання носіїв заряду в напівпровідниках. Зміна рухливості від температури.
4. Залежність концентрації носіїв заряду від температури.
5. Температурна залежність опору вироджених та неvirоджених напівпровідників.
6. Металеві датчики температури.
7. Кремнієві датчики температури.
8. Схеми лінеаризації опору кремнієвих датчиків.
9. Розрахунок лінеаризуючого опору.
10. Терморезистори з від'ємним ТКО.
11. Терморезистори з додатнім ТКО.
12. Міст Уїтстона.
13. Визначення температури за струмом та напругою в схемі Уїтстона.
14. Конструкція планарного датчика температури.
15. Методи керування номіналом датчика.
16. Оптична, електронна та рентгенівська літографія.
17. Позитивний та негативний фоторезист.
18. Основні параметри фоторезистів.
19. Послідовність процесу фотолітографії.
20. Технологічний маршрут виготовлення тонкоплівкового датчика температури.

Лабораторна робота №2

Виготовлення та дослідження ємнісних датчиків вологості

Мета роботи: виготовлення та дослідження характеристик ємнісного датчика вологості

1. Теоретичні відомості

«Значення вологості повітря та інших газів може виявитися суттєвим для контролю різноманітних фізико-хімічних процесів. Необхідність її вимірювання пов'язана з причинами, які можна класифікувати в відповідності з наступними задачами:

- побутове кондиціонування повітря;
- кондиціонування повітря в промисловості;
- визначення залишкової кількості водяної пари;
- експлуатація теплообмінників;
- контроль за роботою сушилок і т.п.» [1]

1.1 Параметри вологості

Під *абсолютною вологістю* r розуміють відношення маси водяної пари m_v до маси m_a сухого повітря в суміші з яким знаходиться ця водяна пара [1]:

$$r = \frac{m_v}{m_a} . \quad (1)$$

Відносну вологість γ визначають як відношення парціального тиску парів води при температурі T до тиску насиченої пари при цій же температурі:

$$\gamma = \frac{P_v}{p_s(T)} 100\% . \quad (2)$$

Температурою точки роси називають температуру, до якої потрібно охолодити вологе повітря, щоб досягти насичення, зберігаючи постійним масове співвідношення вологи в процесі охолодження.

1.2 Гігрометри

Прилади для вимірювання вологості називають гігрометрами. Гігрометри за вимірюваним параметром поділяють на дві групи:

- гігрометри, що засновані на фізичному законі, який дозволяє безпосередньо визначати абсолютну вологість.
- гігрометри, принцип дії яких заснований на вимірюванні властивостей тіл, що пов'язані з вологістю. Ці гігрометри визначають один з параметрів вологого повітря:

- температуру точки роси (наприклад, конденсаційний (рис. 1.а), сорбційний (рис. 1.б) і електролітичний гігрометр);
- температуру вологого термометра, що вимірюють психометрами;
- відносну вологість (наприклад, імпедансні та ємнісні гігрометри).

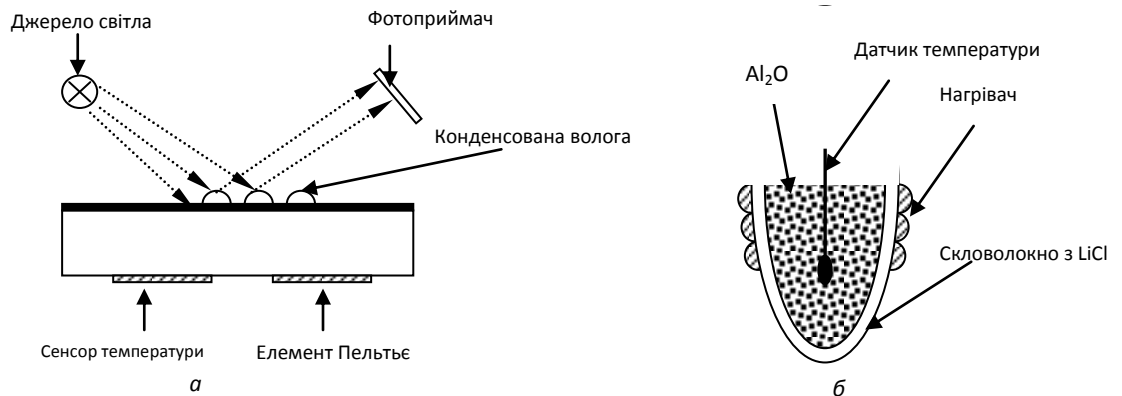


Рис.1 Структурна схема принципу дії гігрометрів:
(а) – конденсаційного; (б) – сорбційного.

Принцип дії сорбційного гігрометра полягає в сорбції вологи $LiCl$ який при цьому переходить в рідкий стан збільшуючи електропровідність Al_2O_3 завдяки чому відбувається регулювання температури нагрівача. Відносна вологість визначається по температурі у момент рівності температури нагрівача та термометра

Співставлення різних типів гігрометрів ускладнено оскільки вони призначені для визначення різних параметрів вологого повітря.

1.2.1 Ємнісні датчики вологості

В основу принципу дії ємнісного та імпедансного типів датчиків вологості покладено явище адсорбції. Найчастіше датчики вологості ємнісного типу реалізують у вигляді планарного конденсатора, схематична конструкція якого наведена на рис. 2.

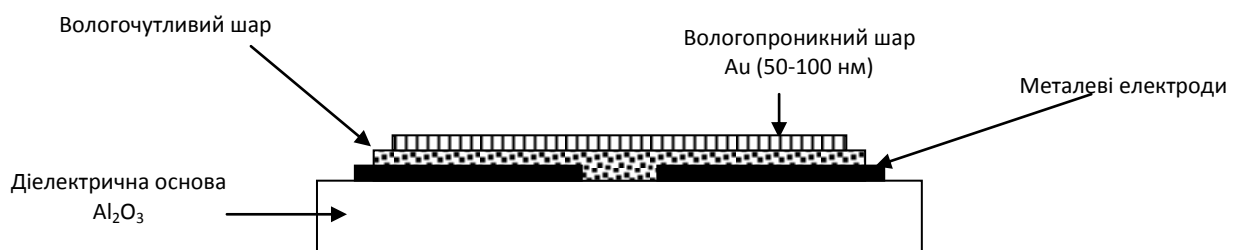


Рис. 2 Схематична конструкція датчика вологості ємнісного типу.

Завдяки адсорбційним якостям діелектрик – вологочутливий шар – планарної конструкції конденсаторів поглинає вологу, яка адсорбується через капіляри на його поверхні.

Розрізняють два види поглинання води: капілярне і поверхневе. Шар

полімерного діелектрика товщиною в декілька мікрон поглинає з оточуючого повітря молекули води, в результаті чого встановлюється рівновага з повітрям. Вода, проникаючи в діелектрик змінює його діелектричну проникність ϵ_d , збільшуючи її до значення діелектричної проникності води ϵ_v . Відомо, що $\epsilon_v=82$, ϵ_d діелектриків – не більше 8. Збільшення діелектричної проникності шару ϵ_d призводить до відповідної зміни ємності конденсатора, в якому використовується цей діелектрик:

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}, \quad (3)$$

де S – площа пластин конденсатора, d – відстань між пластинами.

Для збільшення чутливості ємнісного датчика вологості застосовують гребінчасту структуру планарної ємності (рис. 3).

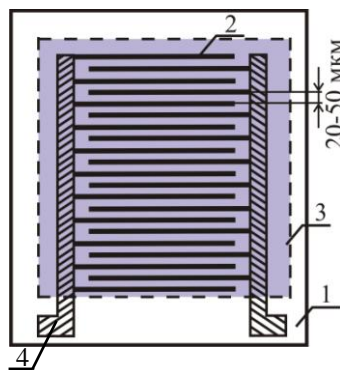


Рис. 3 Планарна структура ємнісного датчика вологості:

1 – підкладка (сітал, кварц); 2 – електрода планарної ємності; 3 – вологочутливий шар; 4 – контакти.

Вибір матеріалу електроду визначається критеріями стійкості до корозії, зменшення процесів електролізу навколо електродної області. Поруч зі золотом Au, для виготовлення електродів застосовують хром Cr, алюміній Al, Pt, нікель Ti-Ni (разом з шаром титану для покращення адгезії).

У якості вологочутливих діелектриків застосовують:

- полімери: поліімід, поліамід, лавсан, поліелектроліти, поліацетат;
- сопополімери (складні полімерні сполуки);
- оксиди, оксидні сполуки: оксид цинку ZnO, оксид церію CeO₂, оксид алюмінію Al₂O₃, титанат барію BaTiO₃, силікагель SiO₂, фосфоросилікатне скло P₂O₅:SiO₂, композити SiO₂:LiCl, SiO₂:Al₂O₃ та інші.

На рис. 4 наведена характеристика $\epsilon = f(\gamma, \%)$ для декількох вологочутливих матеріалів.

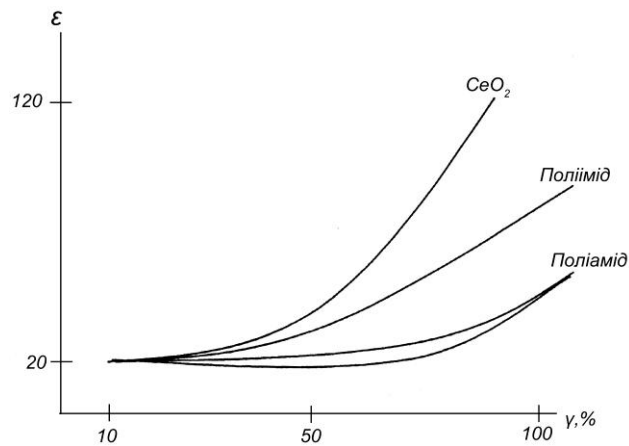


Рис. 4 Залежність діелектричної проникності вологочутливих матеріалів від відносної вологості: оксиду церію, поліїмід, поліаміду.

Як видно з графіку, для поліаміду проявляється незначний гістерезис. Схемна модель чутливого елемента ємнісного датчика вологості представлена на рис. 5.

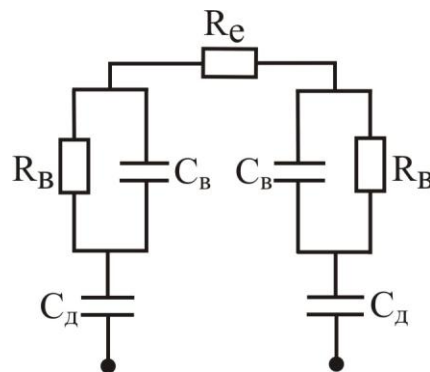


Рис. 5 Схемна модель чутливого елемента ємнісного датчика вологості.
 R_v – опір вологочутливого шару, C_v – ємність вологочутливого шару, C_d – ємність діелектричної підкладки, R_e – опір пористого електрода.

Одним із суттєвих факторів, що визначає швидкодію ємнісного датчика є товщина шару діелектрика.

1.2.3. Сольовий генератор

Для калібрування сенсорів вологості застосовується так званий сольовий генератор – це набір насичених розчинів солей які в закритому об’ємі створюють відоме значення вологості. Солі та відповідні значення вологості наведені в таблиці

LiCl	12%
MgCl ₂	33%
NaNO ₂	63%
NaCl	75%
KCl	85%

1.2.2 Технологічний маршрут виготовлення ємнісного датчика вологості. Процес фотолітографії (див. опис лабораторної роботи №1)

2. Порядок виконання лабораторної роботи

2.1 Технологічний маршрут виготовлення ємнісного датчика вологості

пп 1 - 6 - див. опис лабораторної роботи №1

7. *Нанесення вологочутливого шару.* Після пайки контактів на область гребінчастого електрода наноситься тонкий шар поліамідного лаку та виконується сушка 5-10 хв при 100°C

2.2 Порядок виконання вимірювань

1. Підключити контакти датчика до вимірювального приладу і тричі виміряти ємність датчика.
2. Помістити датчик в першу банку сольового генератора і зачекати 3 хвилини для встановлення рівноваги. Тричі виміряти ємність.
3. Повторити п. 2. для всіх банок сольового генератора і виміряти залежність ємності датчика від відносної вологості.

2.4 Обробка результатів

1. Розрахувати середнє арифметичне значення ємності для кожного значення відносної вологості.
2. Побудувати залежності ємності датчиків від відносної вологості, за графіком визначити відносну вологість в повітрі.
3. За найбільш лінійною ділянкою визначити чутливість датчиків:

$$\alpha = \frac{C_2 - C_1}{\gamma_2 - \gamma_1}$$

4. Написати висновки по роботі.

2.5 Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Схема вимірювання.
3. Порядок виконання роботи.
4. Експериментальні результати в табличному та графічному вигляді.
5. Результати обробки експерименту.
6. Висновки.

2.6 Контрольні питання

1. Призначення датчиків вологості.
2. Параметри вологості.
3. Види гігрометрів.
4. Конденсаційний гігрометр.
5. Сорбційний гігрометр.
6. Ємнісні та імпедансні датчики вологості.
7. Природа зміни ємності в вологочутливому шарі
8. Які матеріали застосовуються у якості вологочутливого шару?
9. Як вибирають матеріал електродів?
10. Структура імпедансного датчика вологості.
11. Структура ємнісного датчика вологості.
12. Еквівалентна схема ємнісного датчика вологості.
13. Класифікація методів фотолітографії.
14. Оптична, електронна та рентгенівська літографія.
15. Основні вимоги до фоторезисту.
16. Позитивний та негативний фоторезист.
17. Основні параметри фоторезистів.
18. Призначення процесу задублювання.
19. Послідовність процесу фотолітографії.
20. Технологічний маршрут виготовлення тонкоплівкового датчика вологості.

Лабораторна робота №3

Виготовлення та дослідження властивостей кремнієвих ФЕП

Мета роботи: виготовлення та дослідження характеристик кремнієвих фотоелектричних перетворювачів

1. Теоретичні відомості

1.1 Принцип дії кремнієвих фотоприймачів

Основою принципу дії більшості напівпровідникових фотоприймачів є фотоелектричні процеси, обумовлені внутрішнім фотоефектом.

Внутрішній фотоефект являє собою процес утворення вільних носіїв заряду усередині речовини при впливі випромінювання.

Взаємодія випромінювання з речовиною (далі будемо розглядати тільки напівпровідники) може відбуватися без зміни або зі зміною енергії падаючого кванта. При цьому відбуваються такі процеси, як пропускання, відбивання, розсіяння, обертання площини поляризації і поглинання випромінювання. Можливе таке поглинання, при якому енергія фотона переходить у пружні коливання кристалічної ґратки, іншими словами, в енергію фононів, що викликає підвищення температури твердого тіла. Цей ефект знаходить практичне застосування в одній з різновидів фотоприймачів – болометрах.

Лише поглинання фотонів, що призводить до появи додаткових рухливих носіїв заряду (фотоносіїв), відноситься до фотоефекту. Фотоефект виявляється в електронних переходах двох типів: власних і домішкових.

Власні переходи (або власна провідність) супроводжуються збільшенням концентрації вільних носіїв заряду обох знаків – і електронів, і дірок. Математична умова початку виникнення власної фотопровідності записується як

$$h\nu \geq E_g, \quad (1)$$

де $h\nu$ – енергія кванта випромінювання. При виконанні цієї умови поблизу границі поглинання, що відповідає рівності в (1), залежність коефіцієнта поглинання від енергії кванта для прямозонних і непрямоzonних напівпровідників відповідно має вигляд:

$$\alpha_{i\delta} = A\sqrt{h\nu - E_g}, \quad (2)$$

$$\alpha_{i\delta\delta} = B(h\nu - E_g \pm h\nu_{\delta i})^2, \quad (3)$$

де A і B – константи; $h\nu_{\text{фн}}$ – енергія фонона, а вибір знака в (3) залежить від того, чи йде процес з віддачею енергії фононові (плюс) або з одержанням енергії від нього (мінус).

Прямозонні переходи відбуваються без зміни імпульсу p_e електрона ($p_e = p_e$), тобто для їхнього здійснення не потрібно участі якого-небудь третього об'єкту, а необхідна лише зустріч електрона і дірки; такі переходи

являють собою ймовірні процеси першого порядку. Для непрямозонних переходів обов'язкова передача частини імпульсу фонону $p_{\text{фн}}$ ($p_{\text{е}}' = p_{\text{е}} + p_{\text{фн}}$). Це процеси другого порядку, і їхня ймовірність набагато менше (на кілька порядків), ніж для прямозонних переходів.

Рівність (1) визначає червону границю фотоефекту:

$$\lambda_{\text{ад}} = \frac{1.23}{E_g}, \quad (4)$$

де $\lambda_{\text{гр}}$ [мкм]; E_g [eV]. Поблизу цієї границі коефіцієнт поглинання зростає дуже швидко, змінюючись, як правило, на 3 - 4 порядки при збільшенні енергії кванта на 0,1 eV. При виконанні умови (1) кожен поглинутий фотон породжує одну пару електрон-дірка або, іншими словами, квантова ефективність $\eta = 1$. Це положення зберігається при підвищенні енергії квантів, і лише при $h\nu > (2...3)E_g$ квантова ефективність починає зростати. При дуже великих енергіях квантів на генерацію пари носіїв заряду в середньому витрачається порція енергії біля $3eV$. Таким чином, енергетично найбільш вигідний фотоефект, викликуваний квантами з $h\nu \approx E_g$; при перетворенні високоенергетичних квантів (короткохвильове випромінювання) значна частина їхньої енергії переходить у тепло.

Домішкове поглинання (домішкова фотопровідність) має місце тоді, коли енергії квантів не вистачає для утворення електронно-діркової пари, але її досить, щоб збудити домішковий атом до стану, коли утвориться вільний електрон і зв'язана дірка або вільна дірка і зв'язаний електрон. Перша відмінність домішкової фотопровідності від власної складається в меншій енергії квантів, що поглинаються: для дуже дрібних акцепторних і донорних рівнів енергія цих квантів може бути в десятки і сотні разів менше E_g . У зв'язку з цим домішкова фотопровідність відкриває широкі можливості створення фотоприймачів ІЧ-діапазону (включаючи далекий ІЧ- і субміліметровий радіодіапазон).

Друга відмінність полягає в тому, що домішкове поглинання веде до генерації лише одного типу носіїв – електронів або дірок, і третя – у тому, що ефективність домішкового поглинання значно менше, ніж власного: у типових випадках концентрація домішкових атомів значно менше (на 6—8 порядків), чим атомів самого напівпровідника. Звідси випливає, що для реалізації поглинання на домішках необхідно використовувати напівпровідники великої товщини, а це завжди веде до небажаного збільшення тривалості релаксаційних процесів. Таким чином, домішкове поглинання варто використовувати лише в тих випадках, коли не вдається підібрати напівпровідник із власним поглинанням у тій же області спектра. Довгохвильова границя домішкового фотоефекта також визначається формулою (4), якщо в ній E_g замінити на енергетичний зазор між домішковим центром і дозволеною зоною, з якою здійснюється обмін носіями заряду.

Отже, при поглинанні фотонів у напівпровіднику (і у твердому тілі взагалі) мають місце квантові електронні переходи, частина з яких (власне і домішкове поглинання) приводить до утворення надлишкової концентрації

вільних носіїв заряду, а частина (екситонне, фононне поглинання і поглинання на вільних носіях заряду) приводить лише до розігріву кристала.

Виникнення вільних носіїв заряду під дією випромінювання складає основу різних фотоелектричних ефектів. В оптоелектроніці знаходять застосування дві форми прояву цих ефектів: фотопровідність – збільшення провідності матеріалу, поява додаткової складової провідності під дією випромінювання (спостерігається в однорідних досить протяжних напівпровідникових зразках) і фотовольтаїчний ефект, що виникає при впливі випромінювання на структури з вбудованим потенційним бар'єром (p-n-перехід, бар'єр Шотткі і т.п.). Носії заряду, що утворюються – електрони і дірки – розводяться вбудованим полем у різні сторони від границі, унаслідок чого виникає додаткова наведена фото-ЕРС і висота наявного потенційного бар'єра зменшується. Якщо різнотипні області структури замкнуті зовнішнім електричним ланцюгом, то під дією фото-ЕРС по цьому ланцюзі починає протікати струм і має місце ефект протікання фотоструму. Явища виникнення фотопровідності, фото-ЕРС, фотоструму утворюють «фізичний фундамент», на якому заснована дія більшості фотоприймачів. Поглинене випромінювання, що приводить до розігріву напівпровідника, з точки зору задач оптоелектроніки губиться даремно.

1.2 Різновиди фотодіодів

1.2.1 Фотодіод з p-n-переходом

Активна структура фотодіода являє собою монокристал напівпровідника, що містить p-n перехід (рис 1).

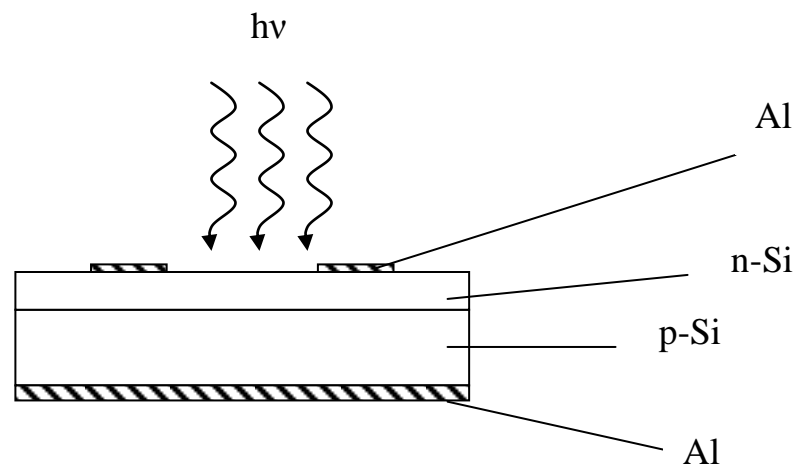


Рис. 1. Конструкція елементарного p-n фотодіоду.

Випромінювання поглинається в області просторового заряду p-n переходу з одночасною генерацією носіїв заряду. Вільні носії заряду розносяться полем p-n переходу і призводять до виникнення фото-ЕРС.

Основними параметрами фотодіоду є квантова ефективність та швидкість фотовідгуку.

Квантова ефективність визначається як співвідношення кількості

електронно-діркових пар до числа фотонів що падають на поверхню.

$$\eta = \frac{I_{\phi} / e}{P / h\nu} = \frac{I_{\phi} h\nu}{Pe}, \quad (5)$$

де I_{ϕ} – фотострум, e – заряд електрона, P – потужність випромінювання, що падає на фотодіод.

Одним з основних факторів, що визначає квантову ефективність є коефіцієнт поглинання. Оскільки коефіцієнт поглинання сильно залежить від довжини хвилі, для конкретного напівпровідника діапазон довжин хвиль, в якому можна отримати максимальний відгук, є обмеженим. Довгохвильова межа квантової ефективності визначається червоною границею фотоефекту (4), а короткохвильова зумовлена тим, що з ростом коефіцієнта поглинання випромінювання поглинається ближче до поверхні, де час рекомбінації є низьким і носії рекомбінують раніше ніж виходять з поверхневого шару.

В свою чергу швидкість фотовідгуку визначається трьома факторами: дифузією носіїв, часом дрейфу через збіднену область і ємністю збідненої області. Носії, що генеруються поза межами збідненої області, повинні дифундувати до р-п переходу, що відчутно збільшує час затримки. Щоб зменшити вплив дифузії необхідно формувати перехід поблизу поверхні. Основна частина випромінювання поглинається в тому випадку, коли область просторового заряду достатньо широка (близько $1/\alpha$). Збіднений шар, водночас, не повинен бути надто широким, інакше час переносу буде обмежувати швидкість фотовідгуку. Окрім того він не має бути і надто вузьким інакше через високу ємність зросте постійна часу. Оптимальною шириною просторового заряду вважається така ширина за якої час переносу рівен приблизно половині періоду модуляції випромінювання.

У базі фотодіода з р-п переходом мають місце тільки дифузійні процеси. Звідси велика інерційність і низька ефективність збирання носіїв заряду при значній товщині бази.

Але р-п фотодіоди мають і важливі переваги. Вони простіше у виготовленні, використання низькоомної однорідної напівпровідникової пластини обумовлює і підвищену однорідність параметрів структур, що виготовляються. Це стає особливо важливим при створенні багатoelementних, матричних фотоприймачів. Відповідно малий питомий електричний опір бази забезпечує більш високі граничні значення фото-ЕРС (до 0,7 В на кремнії), що в ряді випадків виявляється вирішальним фактором.

Основна і винятково важлива перевага кремнієвих р-п фотодіодів полягає в повній сумісності технології їхнього виготовлення з технологією інтегральних мікросхем: практично фотодіодний елемент створюється одночасно з базовою дифузією. Ця обставина з'явилася вихідною точкою розвитку цілого специфічного розділу оптоелектронних фотоприймачів – фоточутливих інтегральних схем (або інтегральних фотоприймачів). У первісному найпростішому варіанті така схема складалася з р-п фотодіода і розташованого на тому ж кристалі високочастотного транзистора; надалі

разом з фотодіодом виготовлялися операційні і ключові підсилювачі, граничні схеми і т.п. Використання можливостей мікросхемотехніки дозволяє в такому фотоприймачі досягти високої фоточутливості і швидкодії, температурної стабільності, виняткової функціональної широти. У той же час використання стандартних технологічних процесів, мала площа, займана мікроелектронною частиною на кристалі, обумовлює низьку вартість фоточутливих мікросхем, практично рівну вартості дискретного фотодіода.

1.2.2 p-i-n-фотодіоди

Активна структура фотодіода являє собою монокристал напівпровідника, що містить перехід, контакт і бар'єр, в області якого має місце стрибок потенціалу (рис. 2)

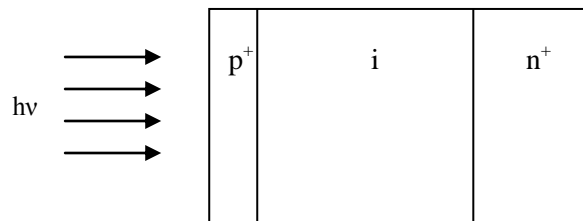


Рис. 2 Геометрична модель p-i-n фотодіода.

Випромінювання з незначними втратами досягає і-бази, у якій поглинається з одночасною генерацією носіїв заряду. При цьому можливе домінування одного з двох явищ: іонізації атомів самого напівпровідника (міжзонні переходи) або спеціально введених у нього домішок. У цьому зв'язку говорять про фотодіоди (або ширше – фотоприймачі), засновані на власному або домішковому фотоефекті. Генерація фотоносіїв заряду в базі призводить до порушення концентраційної рівноваги – починається їхнє переміщення: дірок ліворуч, електронів праворуч. Це переміщення здійснюється завдяки механізму дифузії або, якщо в базі є електричне поле, внаслідок дрейфу. Роль p^+ -і – переходу, що представляє собою потенціальний бар'єр, який утримує дірки в p^+ -області, а електрони в і-області, полягає в поділі згенерованих електронів і дірок. Це спричиняє зміну різниці потенціалів між p^+ - та і-областями, тобто має місце фотовольтаїчний ефект.

В зовнішньому електричному ланцюзі це виявляється подвійно (рис. 3): при малих прикладених напругах (умовно $U_{\text{фд}} = 0$) фотодіод сам генерує деяку ЕРС; при значних зовнішніх зсувах переміщення фотоносіїв веде до появи фотоструму $I_{\text{ф}}$, додаткового до темнового струму $I_{\text{т}}$, що протікає через p^+ -і- n^+ -структуру без впливу випромінювання. Додавання фотоструму до основного здійснюється алгебраїчно, тобто зі знаком «+» або «-»; воно може бути помітно, якщо власний струм фотодіода малий, тобто при зворотному зсуві. Сказане пояснює вид сімейства вольт-амперних характеристик фотодіода: I квадрант – протікання струму, рівного $I_{\text{ф}} + I_{\text{т}}$ (фотодіодний режим), вплив випромінювання є істотним; II – фотодіод виступає як джерело напруги (фотовентильний режим); III – віднімання фотоструму з

прямого струму діода $I_{пр}$ помітне лише при малих значеннях напруги. В оптоелектроніці застосовується фотодіодний режим роботи, тому що саме при ньому досягається висока швидкодія. Фотовентильний режим використовується в основному в сонячних фотоперетворювачах.

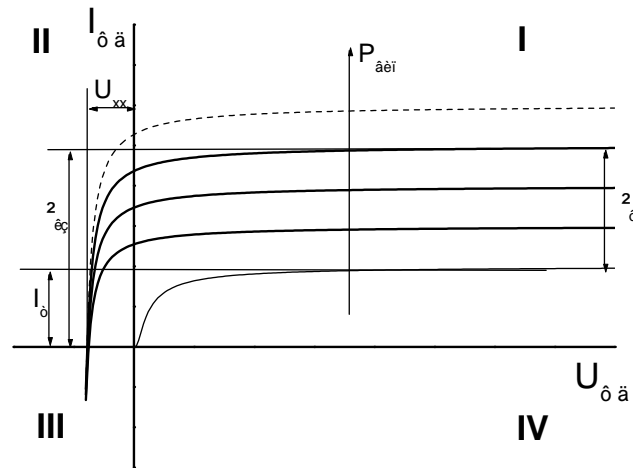


Рис. 3 ВАХ p-i-n фотодіода.

1.2.3 Фотодіод з бар'єром Шотткі

Конструктивно фотодіод Шотткі представляє собою тонкий ($\sim 100\text{\AA}$) шар металу нанесений на напівпровідник n-типу (рис. 4). Перенос зарядів через бар'єр метал-напівпровідник здійснюється переважно основними носіями заряду (електронами) на відміну від p-n переходів, де струм зумовлений неосновними носіями.

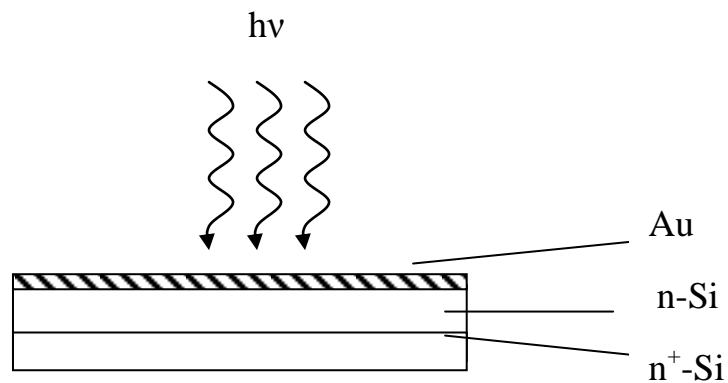


Рис. 4 Конструкція фотодіоду Шотткі.

Діод Шотткі може працювати в різних режимах в залежності від енергії фотонів і прикладеної напруги:

1. $E_g > h\nu > \bar{e}\phi_B$ і $V < V_B$, (рис. 5.a), де V_B – напруга лавинного пробою. Електрони, що збуджені в металі під дією опромінення, подолують бар'єр і будуть потрапляти в напівпровідник.
2. $h\nu > E_g$ і $V < V_B$, (рис. 5.б). Опромінення викликає генерацію електронно-діркових пар і основні характеристики діода дуже подібні до

характеристик р-і-п фотодіода.

3. $h\nu > E_g$ і $V > V_B$, (рис. 5.в). Діод може працювати як лавинний фотодіод. Фотодіоди з бар'єром Шотткі особливо ефективні у видимій та ультрафіолетовій частині спектру.

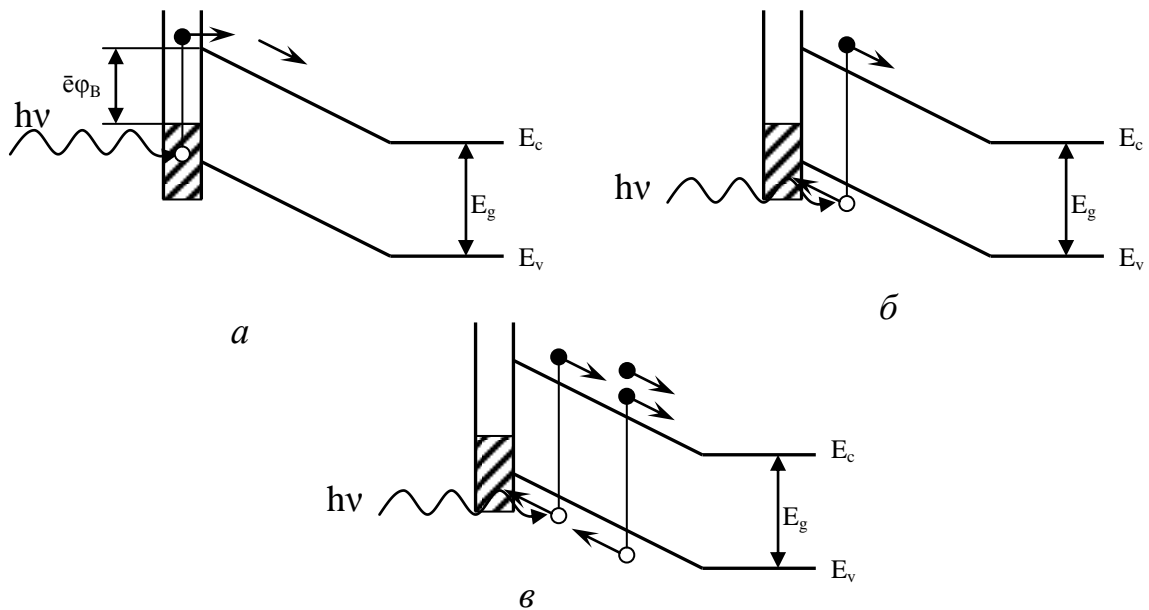


Рис. 5 Фотоemisія електронів з металу в напівпровідник.

1.2.4 Гетерофотодіоди

У конструкції будь-якого гетерофотодіода виділяються, насамперед, дві області: «широкозонне вікно» і активний фоточутливий шар. Широкозонне вікно без втрат пропускає випромінювання до активної області й у той же час є контактним шаром з малим послідовним опором. Процеси в активній області – поглинання випромінювання, збір згенерованих носіїв заряду – у значній мірі протікають так само, як і в кремнієвій р-і-п структурі. Важлива відмінність полягає в тім, що вибором підходящого напівпровідникового з'єднання фоточутливого шару вдається забезпечити повне поглинання випромінювання (у тому числі й у ІЧ-області) при товщині цього шару порядку 1 мкм. Звідси сполучення високої швидкодії і високої фоточутливості при малих живлячих напругах, що для Si р-і-п структур у довгохвильовій області принципово недосяжно: для повного поглинання випромінювання з $\lambda \approx 1,06$ мкм товщина i повинна складати близько 300 мкм, а робоча напруга – сотні вольт. Таким чином, гетерофотодіоди в деякому роді еквівалент кремнієвих р-і-п діодів у довгохвильовій області, хоча їхня значимість цим не вичерпується.

Свобода вибору матеріалу обумовлює і можливість досягнення підвищених значень фото-ЕРС (наприклад, $U^{xx} = 0,8 \dots 1,1$ В у GaAlAs-структур), високого значення ККД перетворення (до 90%); менших, ніж у кремнію, темнових струмів і шумів, розширення температурного діапазону, підвищення стійкості до впливу проникаючої радіації.

Найважливішою перевагою гетерофотодіодів є їх фізична і технологічна

сумісність із пристроями інтегральної оптики. Безсумнівно корисним може виявитися те, що вони можуть бути виготовлені на одному кристалі з випромінювачем і мікросхемою, тобто відкривається можливість створення універсальних монолітних оптоелектронних елементів дуплексного зв'язку. Гетерофотодіоди значно складніше у виготовленні, ніж кремнієві, однак наявні технологічні труднощі поступово долаються. Основні матеріали гетерофотодіодів – GaAlAs для $\lambda \approx 0,85$ мкм і InGaAs, InGaP для $\lambda \approx 1,3 \dots 1,55$ мкм. Гетерофотодіоди працюють і в режимі лавинного множення, причому завдяки малій товщині активної області робоча напруга може складати десятки вольтів. Перешкодою на шляху їхнього розвитку є та обставина, що практично для всіх з'єднань A^3B^5 коефіцієнти розмноження електронів і дірок приблизно однакові, а це веде до підвищеного рівня шумів. Виключення складає GaSb, однак цей матеріал поки усе ще характеризується дуже низькою якістю. Тому значний розвиток лавинних гетерофотодіодів малоймовірно, їхньою альтернативою є інтегровані структури, у яких на одному кристалі напівпровідника A^3B^5 об'єднані гетерофотодіод і МДН-транзистор. Швидкодія таких структур може бути менш 0,1 нс при внутрішнім посиленні близько 10^2 .

1.2.5 Лавинний фотодіод

Являє собою фотодіод, призначений для використання в режимі лавинного множення фотоструму. Практично на фотодіод подають зворотну напругу, яка близька до напруги лавинного пробою. Фотоносії заряду, що генеруються в базі дифундуючи або дрейфуючи, досягають області сильного поля, у якій відбувається їхнє лавинне розмноження. Іншими словами, у ЛФД мається «внутрішнє» підсилення, а оскільки лавина розвивається дуже швидко, це посилення не супроводжується зниженням швидкодії.

Виникає, однак, питання, для чого необхідно це внутрішнє підсилення, якщо ЛФД так само, як і $p-i-n$ фотодіод, підключається до електронної схеми, а її підсилення може бути скільки завгодно великим. Чому недостатньо практично ідеального $p-i-n$ фотодіода, квантова ефективність якого близька до 100%, а шуми дуже малі? Справа в тому, що шуми вхідних каскадів підсилювачів фотосигналів зазвичай на кілька порядків перевершують шуми якісного $p-i-n$ фотодіода. Тому навіть при оптимальному сполученні з електронною схемою реалізувати всі можливості $p-i-n$ фотодіода не вдається, його дуже низький поріг чутливості залишається «річчю в собі». Введення внутрішнього підсилення призводить до зростання співвідношення сигнал/шум за умови, що підсилений шум фотоприймача залишається менше

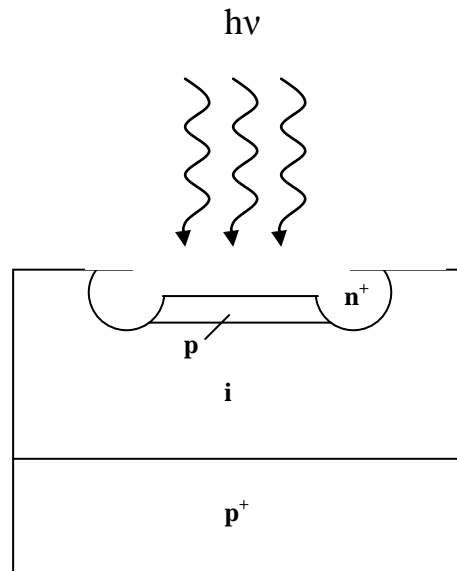


Рис. 6 Структура лавинного фотодіода.

шумів вхідного каскаду підсилювача. Іншими словами, ЛФД мають перевагу перед p - i - n -фотодиодами в умовах прийому слабких, мінімально помітних сигналів.

Для кремнієвого ЛФД оптимальної є n - p - i - p структура (рис. 6). Ця структура, по суті, представляє гібрид p - i - n фотодіода і лавинного p - p діода.

На рис. 6 n - p -діод утворений двома верхніми шарами, а p - i - n -діод – верхнім n^+ -шаром, p^+ -підкладкою й розташованим між ними p - i елементом, що і трактується в даному випадку як i -шар.

При робочих напругах область просторового заряду (ОПЗ) поширюється на всю p - i -базу, при цьому в широкій i -області напруженість електричного поля майже постійна і не дуже велика, а у вузькій p -області різко змінюється й у максимумі досягає значень, достатніх для виникнення і підтримки лавинного розмноження (рис.7).

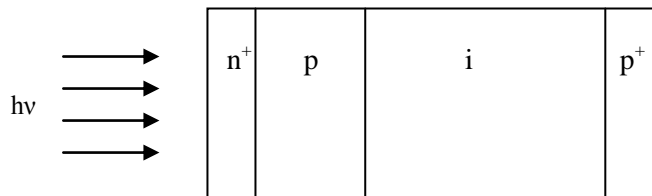


Рис. 7 Геометрична модель лавинного фотодіода.

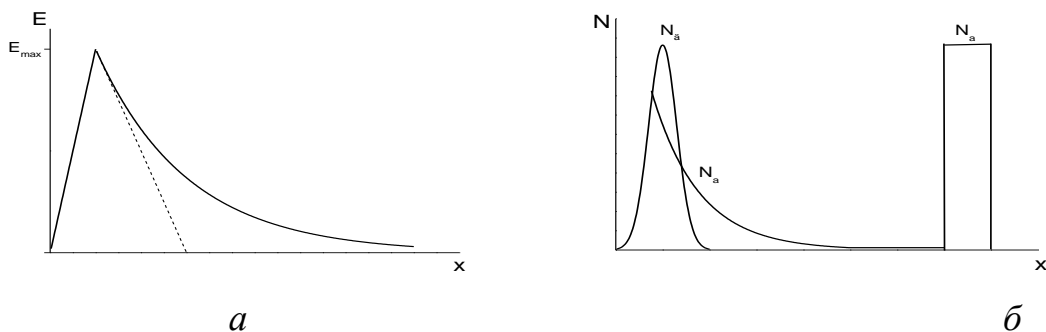


Рис. 8 Розподіл електричного поля (а) та домішок (б) у лавинному фотодіоді.

При впливі типового для оптоелектроніки ближнього ІЧ-випромінювання

основна частка квантів поглинається в і-області; фотоносії заряду, що утворюються, швидко з неї витягаються; електрони, що ввійшли в р-область, при досягненні зони лавинно розмножуються. Дана структура вигідно відрізняється від р-п ЛФД підвищеним квантовим виходом, а від стандартного р-і-п ЛФД – меншою робочою напругою.

Додаткова перевага n-p-i-p структури складається в меншій чутливості коефіцієнта множення до нестабільності і пульсацій зовнішньої напруги в порівнянні з р-п-ЛФД. Це обумовлено стабілізуючою дією широкого і-шару, що у значній мірі згладжує коливання напруги.

Порівняння ЛФД із р-і-п фотодіодом показує, що для ЛФД характерний ряд істотних недоліків:

- складність, унікальність виготовлення, висока вартість;
- високі робочі напруги, значні втрати потужності; робота лише в режимі підсилення малих сигналів і, як наслідок, непридатність для вбудовування в мікросхеми;
- необхідність твердої стабілізації робочої напруги і температури, що ускладнює широке використання цих приладів;
- відсутність конструкцій матричного типу на основі ЛФД, відсутність перспективи створення таких конструкцій, що робить ЛФД непридатними для використання в багатоканальних пристроях обробки інформації.

Разом з тим унікальне поєднання значного підсилення і високої швидкодії з прийнятним рівнем шумів обумовлює конкурентоздатність лавинних фотодіодів, особливо при їхньому використанні в такому найважливішому напрямку оптоелектроніки, як волоконно-оптичні лінії зв'язку.

1.2.6 МДН-фотодіод

Фоточутлива МДН-структура, використовується в різних електричних режимах.

Фотодіодні режими роботи МДН-структури також виявляються в декількох формах. Фотогенерація і поділ електронів і дірок вбудованим полем приповерхньої збідненої області викликає фотовольтаїчний ефект. Наведена фото-ЕРС, як і у випадку вентильного режиму звичайного фотодіода, служить вхідним сигналом для відповідної електронної схеми; відмінність полягає в тому, що, оскільки внутрішній опір МДН-фотодіода нескінченний, вхідний опір схеми також повинний бути великим. Звичайно використовуються схеми, що виготовляються по МДН-технології.

Той же ефект фотогенерації носіїв заряду виявляється й іншим способом, а саме в зміні ширини області просторового заряду і відповідно ємності структури, тобто у формі фотоємнісного ефекту. В режимі фотоварикапа МДН-структура цікава тим, що зручно вбудовується в популярні перетворювачі світло – частота, а також характеризується мінімальним рівнем власних шумів, як і будь-яка майже ідеальна реактивність, тому що в цьому режимі відсутні основні джерела шуму – темновий струм і фотострум.

Спеціальні МДН-структури з дуже тонким «тунельно-прозорим» діелектриком пропускають електричний струм і по властивостях близькі до фотодіодів з бар'єром Шотткі. Якщо діелектрик непрозорий для носіїв заряду, то фотострум також може протікати через структуру, але лише протягом часу, необхідного для встановлення нового рівноважного стану. Іншими словами, при роботі в імпульсному, динамічному режимі МДН-фотодіод генерує струмові сигнали точно так само, як будь-який інший фотодіод. Концепція динамічного режиму породила і ще більш своєрідний МДНДМ-фотодіод, у якому фотоносії заряду просторово розводяться під дією прикладеної напруги, але з кристала не виходять, а можуть лише рекомбінувати. Це дозволяє одержати значне посилення фотоструму подібно тому, як це відбувається у фоторезисторах.

Нарешті, МДН-структура може працювати в динамічному режимі лавинного множення фотоструму: зовнішня напруга подається у виді прямокутного імпульсу, а реєструємий оптичний сигнал надходить лише під час дії імпульсу. Принципова відмінність від звичайних ЛФД полягає в самостабілізації розвитку лавини по всій площі фоточутливої поверхні. Відомо, що якщо підвищувати напругу, усе більше наближаючи до $U_{проб}$, то стають істотними мікроплазмові явища, що приводять до того, що пробій локалізується в окремих випадкових крапках площини $p-n$ переходу. У МДН-структурі при виникненні мікроплазми і збільшенні струму напруга перерозподіляється так, що велика його частина починає падати на діелектрику — це охороняє від стягування лавини в окремі крапки. Звідси випливають два важливих наслідки: можливість досягнення дуже високих значень коефіцієнта множення (до $M \approx 10^5$, у звичайних ЛФД $M = 10^2 \dots 10^3$) і створення великих і однорідних фоточутливих площ (до декількох квадратних сантиметрів).

У деяких випадках МДН-фотодіод виступає як складова частина більш складного приладу. Одна з таких можливостей характерна для фото-ПЗЗ (рис. 9.), де випромінювання перетворюється в заряд неосновних носіїв заряду, що накопичується на границі розділу напівпровідник — діелектрик і при необхідності зчитується (переноситься уздовж поверхні) завдяки механізму зарядового зв'язку. Той же заряд модулює провідність приповерхньої області (МДН-канал), що веде до зміни вихідного сигналу МДН-транзистора або опори МДН-фоторезистора. Зарядовий обмін між напівпровідником і діелектриком викликає поляризацію діелектрика, що зберігається тривалий час і після припинення дії випромінювання. Відбувається «запам'ятовування» світлового сигналу, при оптичних або електричних впливах записану інформацію можна зчитувати.

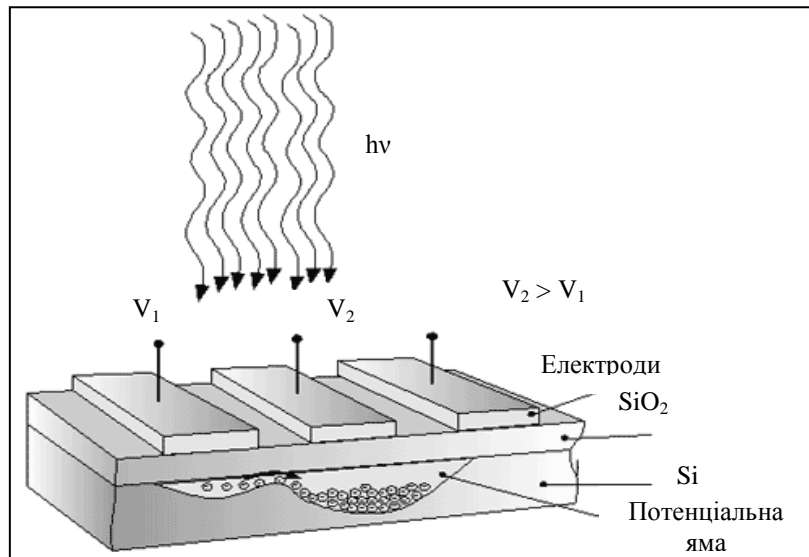


Рис. 9 МДН-фоточутлива структура як елемент ПЗЗ матриці.

Параметри МДН-фотодіодів знаходяться в дуже тісній залежності від технологічної досконалості структури. Необхідно зазначити, що незважаючи на удавану зовнішню простоту, виготовити якісну МДН-структуру значно складніше, ніж р-п-перехід, тому що р-п перехід створюється всередині монокристала, а в МДН-елементі взаємодіють матеріали структурно і хімічно різномірні. Як правило, діелектрична плівка виходить не суцільна, не стехіометрична, містить ті або інші сторонні включення. Особливо небезпечні іони лужних металів, що мають помітну рухливість і викликають нестабільність параметрів. Подолання технологічних недосконалостей дозволить повною мірою використовувати всі потенційні переваги МДН-фотодіодів, які можна згрупувати в такий спосіб:

- функціональна широта, що виявляється в тому, що еквівалентом оптичної інформації в них можуть виступати електричний заряд, зміна провідності каналу, поляризація діелектрика, фото-ерс, фотоємність, постійний або імпульсний фотострум;
- конструктивно-технологічна гнучкість, тобто можливість варіювання гамою напівпровідників, діелектриків і металів, «низькотемпературність» більшості процесів, використання монокристалічних планарних і тонкоплівкових структур;
- високі значення визначальних фотоелектричних параметрів, можливість зміни їх у широкому діапазоні: МДН-фотодіоди можуть працювати й у короткохвильовій області (як фотодіоди з бар'єром Шотткі), і в довгохвильовій (як р-і-п структури); наявність діелектрика дозволяє одержувати мінімальні темнові струми (і, як наслідок, малі шуми) і т.п.;
- фізична, електрична, технологічна сумісність з біполярним і особливо з МДН-мікросхемами.

Остання обставина, як уже неодноразово підкреслювалося, особливо істотна при створенні оптоелектронних і мікроелектронних пристроїв

високого ступеня інтеграції.

2. Технологічні аспекти виготовлення кремнієвих фотодіодів

2.1 Процес дифузії

Для легування поверхні напівпровідникових пластин при виготовленні напівпровідникових пристроїв, інтегральних схем використовують дифузію та іонне легування. Дифузія є найбільш широко застосованим методом легування.

Дифузія – це процес переносу домішок з області з високою концентрацією в область з низькою концентрацією, стимульований високою температурою.

Атоми електрично активних домішок проходять через поверхню напівпровідникового матеріалу, дифундують в ґратку кристалу та формують області р- та n-типу електропровідності. Методом дифузії формують активні, пасивні елементи інтегральних мікросхем (ІМС) та ізоляцію. Найчастіше використовують локальну дифузію з застосуванням захисних масок із діелектричних плівок.

Можливі чотири *механізми дифузії*: вакансійний, міжвузловий, естафетний та краудіонний.

Вакансійний механізм – зумовлений присутністю в монокристалах точкових дефектів та міжвузлових атомів. При підвищенні температури атоми в вузлах кристалічної ґратки коливаються поблизу положення рівноваги. Час від часу вони отримують енергію, достатню для того, щоб вийти з вузла та стають міжвузловими. В ґратці з'являється вакансія. Сусідній атом, будь то атом домішки або власний атом напівпровідникового матеріалу, може мігрувати на місце цієї вакансії. Якщо мігруючий атом є власним, то іде процес самодифузії, а якщо домішковим – домішкова дифузія.

При *міжвузловому механізмі* атом переходить із одного положення в інше, не потрапляє при цьому в вузли кристалічної ґратки. Таким чином здійснюється пряме переміщення атомів по міжвузлях. Такий механізм найбільше можливий для домішок, атоми котрих мають малі розміри.

Коли в процесі переміщення міжвузлові атоми витісняють атом із вузлу ґратки та заміщують його, а витіснений атом стає міжвузловим, то такий механізм стає *естафетним*. Якщо міжвузловий атом витісняє атом, який знаходиться в вузлі та зміщує його на період ґратки, то такий механізм дифузії називається *краудіонним*.

Дифузію домішок для формування р-n переходу можна отримати при двох умовах: постійній поверхневій концентрації (дифузії з необмеженого джерела) та постійного числа легуючих атомів (дифузія з обмеженого джерела). В першому випадку домішкові атоми дифундують з джерела, нанесеного на поверхню кремнієвої підкладки. Таке джерело підтримує

постійну поверхневу концентрацію під час всього процесу дифузії. Дифузія з іонно-імплантованих шарів може бути прикладом другого випадку.

Дифузія з необмеженого джерела описується рівнянням

$$C(x,t) = C_s \cdot \operatorname{erfc} \left[\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right], \quad (6)$$

де C_s [см⁻²] – постійна поверхнева концентрація;

D [см²/с] – постійний коефіцієнт дифузії;

X [см] – відстань по осі координат з урахуванням, що $x=0$ знаходиться на поверхні кремнію;

t [с] – час дифузії;

erfc – додаткова функція помилок.

Глибина, на якій концентрація дифундуючих домішок дорівнює концентрації первинної домішки в основі, називається металургійним переходом.

Дифузія з обмеженого джерела описується рівнянням виду

$$C(x,t) = \frac{S}{\sqrt{\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}}, \quad (7)$$

яке називають гаусовим розподілом, а умову проведення дифузії відносять до дифузії з попереднім осадженням. Експериментально визначені коефіцієнти дифузії в діапазоні використаних для дифузії температур часто можуть бути записані у вигляді

$$D = D_0 e^{-\frac{E}{kT}}, \quad (8)$$

де D_0 [см²/с] – константа дифузії;

E [eV] – енергія активації;

T [K] – температура;

k [eV·K] – постійна Больцмана.

Енергія активації пов'язана з енергіями, необхідними для руху та енергіями потрібними для формування дефектно-домішкових комплексів. В металах і для деяких елементів в кремнії в випадку простої вакансійної моделі дифузії величина E знаходиться в інтервалі 0,6...1,2 eV.

Коли концентрації домішки з врахуванням рівню легування підкладки та концентрації дифузанта перевищують власну $n_i(T)$, кремній розглядається як домішковий напівпровідник та коефіцієнт дифузії вважається невласним коефіцієнтом дифузії.

Результати процесу дифузії можна проконтролювати простими вимірами наступних параметрів: глибини р-п переходу та поверхневого опору дифузійного шару. Глибину р-п переходу звичайно визначають хімічним забарвленням відшліфованого під невеликим кутом зразка (косий шліф кут 1-5° або куля-шліф) у суміші 10 мл плавикової кислоти та 100 мл води. Якщо зразок занурити в таку суміш та витримати на яскравому світлі 1-2 хвилини, то область р-типу провідності буде виглядати темніше у порівнянні з областю n-типу провідності.

Величину поверхневого опору дифузійного шару можна виміряти чотирьохзондовим методом.

Середня величина поверхневого опору дифузійного шару пов'язана з глибиною р-n переходу X_j ; рухливістю носіїв заряду μ та розподілом домішки по глибині дифузійного шару $N(x)$ наступним чином:

$$\rho_s = \frac{1}{q \int_0^{x_j} \mu N(x) dx} \quad (9)$$

Для даного дифузійного профілю середня величина питомого опору однозначно пов'язана з поверхневою концентрацією дифузійного шару та рівнем легування підкладки при передбаченому дифузійному профілі. При високій концентрації домішки та малої глибині дифузії неможливо уявити дифузійний профіль простими функціями. Оскільки виміри глибини р-n переходу та поверхневого опору достатньо прості та несуть важливу інформацію про дифузійний шар без використання складних та трудомістких способів вимірювання профілю розподілу, вони, за звичай, використовуються для контролю дифузійного процесу.

В технології виготовлення ІМС процеси дифузії займають дуже важливе місце. Процеси дифузії використовують для створення базових та емітерних областей та резисторів в біполярній технології виготовлення напівпровідникових пристроїв, для створення областей витоку та стоку в МДН-технологіях та для легування полікремнію.

Легуючі атоми в дуже широкому діапазоні концентрацій можуть бути введені в кремнієві основи шляхом:

- дифузії із хімічного джерела в газовій формі при високих температурах;
- дифузії із легуваних окислів;
- дифузії із іонно-імплантованих шарів та відпалювання.

Кінцева мета дослідження процесу дифузії – можливість розрахунковим шляхом визначити електричні характеристики напівпровідникового пристрою на основі технологічних параметрів процесу.

Фосфор використовується не тільки для формування емітерних та базових областей біполярних транзисторів, але й для гетерування швидкодифундуючих домішків, таких як мідь та золото. Ці домішки висаджуються на дефектах кристалічної структури, приводять до збільшення струмів витіку зворотно зміщених р-n переходів. Тому фосфор неможливо замінити в технології ІМС. Однак, р-n транзистори з емітерами, отриманими дифузією арсенію, мають більш високий коефіцієнт підсилення при низьких рівнях струму та кращу відтвореність ширини базової області у порівнянні з транзисторами, емітери яких були отримані дифузією фосфору. Тому в технології ІМС використання фосфору в якості активного легуючого елементу в мілких р-n переходах з малими лінійними розмірами в низькотемпературних процесах обмежено використанням його для легування базових областей р-n-р транзисторів та для формування гетерів. Для

створення областей витоку та стоку n-канальних МДН-транзисторів частіш за все використовують арсеній.

Характерний дифузійний профіль легування фосфором можна розділити на 3 області: область високої концентрації, яка переходить в так звану область “перегину дифузійного профілю” та область низької концентрації.

Джерела дифузії фосфору: газоподібні дифузанти, які подають із балону та перед входом в реактор змішують з азотом та киснем. В зоні реакції формується оксид легуючого елементу, а на поверхні кремнієвих пластин виділяється елементарна домішка.

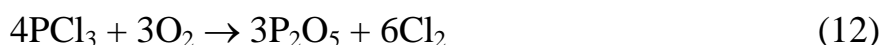
Наприклад, процес дифузії фосфору супроводжується реакціями:
В трубці:



На поверхні кремнію:



Пари рідких дифузantів із дозатора розбавляють газом – носієм, а також формуються оксиди відповідних елементів, наприклад:



Тверді планарні джерела призначені для дифузії фосфору в кремнієві пластини. Ці джерела представляють собою термостійкі диски зі спеченим з обох сторін дифузантом на основі матеріалу, який містить фосфор. П’ятиокись фосфору виділяється твердим джерелом, дифундує до поверхні кремнію та вступає у взаємодію з нею з формуванням фосфорсилікатного скла. З цієї поверхні йде дифузія домішки у глибину пластини.

У порівнянні з рідкими та газоподібними джерелами, застосування твердих джерел має ряд переваг: підвищення в 3-5 рази однорідності та відновлюваності дози легування, покращення електричних параметрів елементів, зниження токсичності процесів та покращення екологічних показників, підвищення виробництва в 1,5 - 2 рази, зручність застосування.

Параметри напівпровідникового пристрою визначаються значенням поверхневої концентрації домішки, глибини р-n переходу та профілю розподілу домішки.

1.4 Процес фотолітографії

(див. опис лабораторної роботи №1)

2. Порядок виконання лабораторної роботи

2.1 Прилади й устаткування

- Піч дифузійна СДО 125/3-15.
- Установка суміщення та експонування.

- Центрифуга для нанесення фоторезисту.
- Установка сушки.
- Термошафи.
- Фотошаблони.
- Фоторезист, розчини для прояву, травлення, зняття фоторезисту.
- Джерело живлення Б5-47.
- Цифровий вольтамперметр Б7-35.
- Джерело опромінення – вольфрамова лампа (джерело А).

2.2 Технологічний маршрут виготовлення кремнієвих фотодіодів

1. Дифузія бору.

Процес дифузії відбувається в дифузійній пічці при температурі 900-950°C.

2. Травлення плівки боро-силікатного скла.

Відбувається в розчині $\text{HF:H}_2\text{O}$ 1:10 протягом 3-5 хвилин до зникнення плівки окислу (визначається за ефектом гідрофобності кремнію). Після травлення промивають пластину в воді і виконують сушку на центрифугі.

3. Нанесення контактної плівки.

Нанесення плівки виконується методом вакуумного електронно-променевого випаровування. (див. лабораторну роботу №1)

4. Фотолітографія. (див. лабораторну роботу №1)

5. Контроль зображення.

Після термообробки проводиться контроль отриманого зображення за допомогою мікроскопу.

6. Травлення плівки металу. (див. лабораторну роботу №1)

7. Скрайбування(див. лабораторну роботу №1)

2.3 Порядок виконання вимірювань

1. Зібрати схему вимірювання вольт-амперних та люкс-амперних характеристик (рис. 13).
2. Підключити фотодіод до зажимів схеми вимірювання.
3. Визначити полярність підключення фотодіоду, подавши напругу 1 В в одному та протилежному напрямку (пряма та зворотня характеристика).

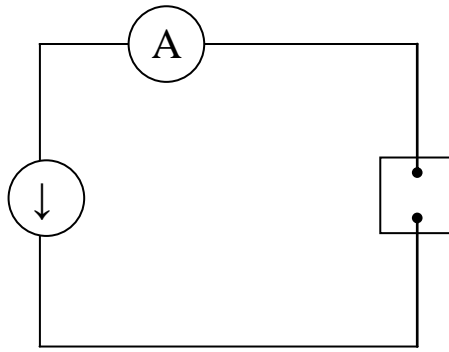


Рис. 13 Схема вимірювання передавальної функції кремнієвих фотодіодів.

4. Виміряти пряму гілку вольт-амперної характеристики в діапазоні 0,1...0,6 В (струм не повинен перевищувати значення 50 мА), крок 0,1В, темновий режим.
5. Змінити полярність підключення фотодіода і виміряти зворотню гілку вольт-амперної характеристики в діапазоні 0,5...5 В, крок 0,5 В в темновому режимі.
6. Повторити п.п.4-5 для 4 значень освітлення (задаються викладачем).
7. Підключити фотодіод до вольтметра та виміряти залежність фотоЕРС від рівня освітлення (задається викладачем).

2.4 Обробка результатів

1. Побудувати вольт-амперні характеристики фотодіодів.
2. Побудувати залежність фотоструму від рівня освітлення (люкс-амперна характеристика) при напрузі 5В.
3. Побудувати залежність фото-ЕРС від рівня освітлення.
4. Розрахувати коефіцієнт фоточутливості за формулою:

$$K_{\Phi} = \frac{I_{\Phi 2} - I_{\Phi 1}}{\Phi_2 - \Phi_1}$$

5. Написати висновки по роботі.

2.5 Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Схема вимірювання.
3. Порядок виконання роботи.
4. Експериментальні результати в табличному та графічному вигляді.

5. Результати обробки експерименту.
6. Висновки.

2.6 Контрольні питання

1. У чому полягає внутрішній фотоефект?
2. Як визначається червона границя фотоефекту?
3. Які відмінності притаманні домішковому поглинанню?
4. Елементарний фотодіод і його основні параметри
5. Що таке квантова ефективність?
6. Переваги р-п фотодіодів.
7. Особливості р-і-п фотодіодів.
8. Діоди Шотткі та можливі режими їх роботи.
9. Гетерофотодіоди.
10. Лавинні фотодіоди, принцип роботи.
11. Переваги та недоліки лавинних фотодіодів.
12. Режими роботи МДН-фотодіодів.
13. Фото ПЗЗ – пристрої.
14. Переваги МДН-фотодіодів.
15. Які фотодіоди забезпечують підсилення сигналу?
16. Механізми дифузії.
17. Дифузія з обмеженого та необмеженого джерела.
18. Чим визначається роздільна здатність фотолітографічного процесу?
19. Послідовність фотолітографічного процесу.
20. Що таке позитивний та негативний фоторезист?

Лабораторна робота №4

Дослідження оптоволоконних сенсорів температури

Мета роботи: ознайомитись з принципом дії пасивних волоконно-оптичних сенсорів температури амплітудного типу; дослідити передавальну функцію.

1. Теоретичні відомості

1.1 Принцип дії оптоволоконна. Види оптичних волокон. Переваги та недоліки

Оптоволоконно (ОВ) є оптичний хвилевод; конструктивно являє собою тонкий (\varnothing 10...500 мкм) діелектричний стрижень (серцевина), що вкритий шаром речовини (оболонка) з меншим показником заломлення n_2 .

Принцип дії ОВ засновано на явищі повного внутрішнього відбивання, яке відбувається за умови:

$$n_1 > n_2 \quad (1)$$
$$\theta = \arcsin \sqrt{n_1^2 - n_2^2},$$

де n_1, n_2 – показник заломлення матеріалів серцевини та оболонки відповідно; θ – найбільше значення кута (числова апертура), що забезпечує направляючу дію ОВ.

Оптичне волокно (світловод) у відповідності до режиму використання розрізняють двох типів:

- одномодове;
- багатомодове,

що конструктивно розрізняються діаметром сердечника.

Одномодове ОВ, маючи малий діаметр (\varnothing 10 – 20 мкм) сердечника, ускладнює юстування (з'єднання елементів волоконно-оптичного тракту), але створює умови для розповсюдження лише найшвидшої моди – основної.

Багатомодове ОВ має більший діаметр сердечника (\varnothing 20 – 500 мкм), що створює умови для розповсюдження багатьох мод (від декількох до близько сотні). Оскільки групова швидкість кожної моди різна (дисперсія), це призводить до спотворення сигналу при його розповсюдженні вздовж ОВ.

Перевагою *багатомодових* оптоволокон (світловодів) є суттєве спрощення процесу юстування (наприклад, з'єднання волокон цього типу, введення в них світлового променя лазера та інше).

Внаслідок цього *одномодові* оптичні волокна переважно застосовують в лініях зв'язку, що вимагають високої швидкості передачі інформації, а *багатомодові* – в лініях зв'язку з порівняно невисокою швидкістю передачі інформації.

Хоча при використанні оптичних волокон для сенсорів вищевказані фактори теж мають місце, але через специфіку сенсорів роль цих факторів дещо інша. У сенсорах довжина світловодів значно менша ніж у лініях зв'язку, а тому фактор дисперсії не є настільки вагомим. Тому у сенсорній

оптоелектроніці, за винятком сенсорів-інтерферометрів, найчастіше використовують *багатомодові* оптичні волокна. При використанні ОВ для когерентних вимірів, коли з цих волокон формується інтерферометр, важливою перевагою *одномодових* волокон є можливість передачі інформації про фазу оптичної хвилі, що є неможливим за допомогою *багатомодових* волокон. Для створення сенсорів використовують головним чином багатомодові волокна й пучки волокон (джгут з оптоволокон).

Основні переваги оптичних волокон:

- широка смуга пропускання (декілька десятків терагерц);
- малі втрати (≥ 0.154 дБ/км);
- малий діаметр (≤ 0.5 мм);
- мала маса (~ 30 г/км);
- еластичність (мінімальний радіус вигину 2 мм);
- механічна міцність (навантаження на розрив до 7 кг);
- вибухобезпечність;
- висока корозійна стійкість» [7]

1.2 Волоконно-оптичні сенсорі. Різновиди та принцип дії

Основними елементами волоконно-оптичних сенсорів (ВОС) є

- джерело світла (світловипромінювач): світлодіод, лазер, ...;
- фотоприймач: фоторезистор, фотодіод, фото транзистор,...;
- оптоволокно.

На рис. 1 представлено структурну схему волоконно-оптичного сенсора. Джерело світла і фотоприймач потребують узгодження за інтенсивністю, чутливістю та спектральною характеристикою.

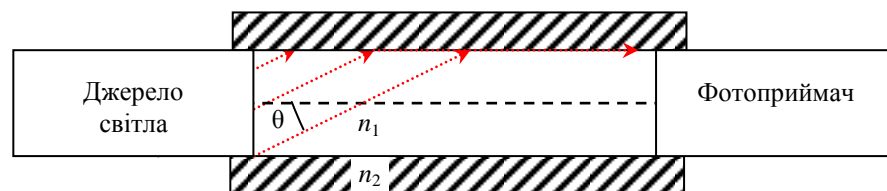


Рис.1 Структурна схема волоконно-оптичного сенсора

У волоконно-оптичних сенсорах оптоволокно може бути застосоване як лінія передачі (*пасивні* ВОС), а може відігравати роль самого чутливого елемента сенсора (*активні* ВОС). В останньому випадку використовують чутливість оптоволоконна до електричного поля (ефект Керра), магнітного поля (ефект Фарадея), до вібрації, температури, тиску, деформаціям (наприклад, до вигину). Багато з цих ефектів в оптичних системах зв'язку оцінюють як недоліки, у сенсорах же їхня поява вважається перевагою.

Принцип дії оптоволоконних сенсорів ґрунтується на зміні параметрів світлових хвиль під дією факторів, що вимірюються.

Світло – електромагнітне поле оптичного діапазону – описують

гармонійним законом:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(\omega t + \varphi), \quad (2)$$

де E_0 – амплітуда, \vec{E}_0 – вектор поляризації, ω – частота, φ – фазовий зсув.

Відповідно до (2) розрізняють 4 типи волоконно-оптичних сенсорів:

- амплітудні;
- частотні;
- фазові;
- поляризаційні.

Переважною є амплітудна модуляція світлової хвилі, оскільки не потребує додаткової схеми обробки вихідного сигналу оптичного сенсора; амплітудно-модульований сигнал безпосередньо реєструється фотоприймачем. Проте слід взяти до уваги й недолік амплітудної модуляції – залежність вихідного сигналу від потужності джерела світла, яка в свою чергу може сильно залежати від температури оточуючого середовища (наприклад, для світлодіодів до 1,5 %/°C).

Переваги волоконно-оптичних сенсорів:

- відсутність електричного потенціалу в зоні вимірювання;
- висока стійкість до зовнішніх впливів, відсутність статичного заряду;
- не вимагають «електроду порівняння». Опорна хвиля може розповсюджуватися одночасно з робочою;
- придатні для застосування in-vivo;
- можливість створення мультипараметричних сенсорів;

Недоліки ВОС:

- вплив зовнішнього освітлення;
- сигнал залежить від кількості реагентів (інтенсивності впливу), що обмежує можливості мікромініатюризації;

1.2.1 Волоконно-оптичні сенсори температури амплітудного типу

Сенсори з оптичним перетворювачем (рис. 2) являють собою систему, яка вміщує оптично чутливий матеріал, що перетворює зміни параметрів зовнішнього середовища в зміни параметрів світлового променя. Перетворювач розміщують між торцями передаючого і приймального оптичного волокна.

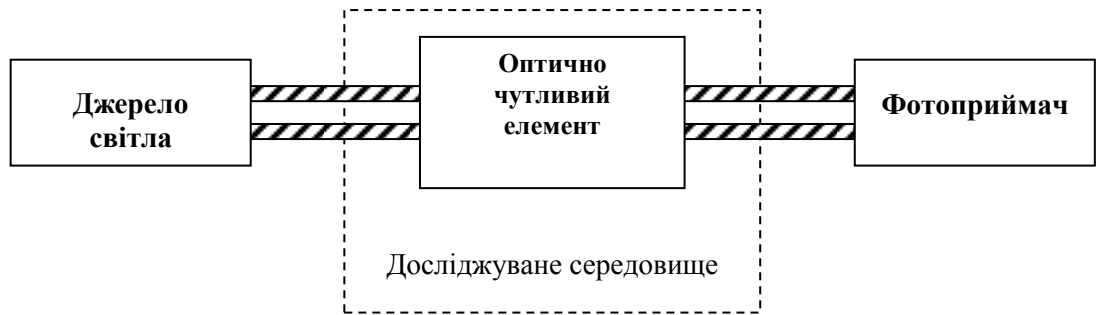


Рис.2 Структурна схема пасивного волоконно-оптичного сенсора.

Типова схема оптоволоконного сенсора не завжди є зручною для біомедичного застосування, в такому випадку більш придатна система «катеторного» типу (рис. 3), яку будують з використанням різноманітних явищ (наприклад, флюоресценція, теплове випромінювання, тензоефект та інші).

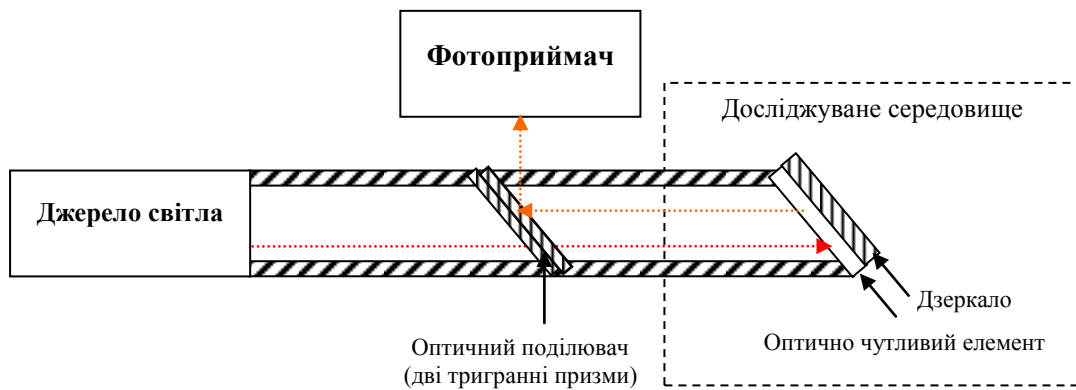


Рис. 3 Структурна схема ВОС катеторного типу

1.2.1.1 ВОС на основі теплового випромінювання

Будь-яка речовина (об'єкт) за температури $T > 0$ К внаслідок теплових коливань його атомів і молекул виділяє енергію теплового випромінювання. Енергія теплового випромінювання W_λ на довжині хвилі λ , що випускається чорним тілом за температури T , виражається формулою Планка (в одиницях $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{ср}^{-3}$)

$$W_\lambda = c_1 \lambda^{-5} \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1}, \quad (3)$$

де c_1 і c_2 – постійні коефіцієнти.

Сумарну енергію випромінювання (у ваттах на квадратний метр) визначають шляхом інтегрування (3) по всім довжинам хвиль

$$W_t = \pi \int_0^\infty W_\lambda d\lambda = \sigma T^4, \quad (4)$$

де $\sigma = 5.7 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ – постійна Стефана-Больцмана.

Між λ і T існує залежність, що визначає довжину хвилі

$$\lambda_m [\text{м}] = 2,9 \cdot 10^{-3} / T [\text{К}], \quad (5)$$

навколо якої відбувається найбільша потужність теплового випромінювання. Але енергія теплового випромінювання будь-якого тіла залежить від хімічного складу та стану поверхні тіла, тому, щоб відрізнити цю енергію від енергії випромінювання чорного тіла, вводиться коефіцієнт ε , який характеризує випромінювальну здатність. Щоб зменшити похибку вимірювання, що виникла через нерівність ε одиниці, зазвичай використовують метод двох хвиль. При цьому вимірюють інтенсивність теплового випромінювання на двох довжинах хвиль, що заходять у спектр випромінювання, і по їх співвідношенню визначають температуру.

В залежності від діапазону вимірюваних температур вибирають світлові детектори і оптичні волокна. Зазвичай для температур вище 600°C детектори створюють на основі кремнію, для температур нижче 600°C – використовують германій, з'єднання PbS тощо. Діапазон прозорості оптичного волокна з кварцового скла $0,4 \dots 2,0$ мкм, тому область вимірюваних температур для волоконно-оптичного вимірювача теплового випромінювання простирається приблизно від 400°C до 2000°C . При вимірюванні більш низьких температур необхідна розробка оптичних волокон, що прозорі для випромінювання інфрачервоного діапазона спектра. Перевага такого способу – можливість безконтактного вимірювання високих температур.

Одним із застосувань волоконно-оптичного сенсора температури на основі теплового випромінювання – спостереження за неперервним процесом лиття в чорній металургії. Світло, що випромінюється гарячою відливкою, сприймається термостійкими кварцовими стержнями світлового детектора, розташованими в ряд, і посиляється за допомогою оптоволокон в твердій оболонці до вимірювального віконця. Тут проводиться сканування кожного волокна, зв'язаного зі світловим детектором, і далі сигнал обробляється за методом двох хвиль. Таким чином проводиться контроль та стеження за розподілом температури у виробі.

1.2.1.2 ВОС на основі флуоресценції

На торець оптичного волокна світлочутливої частини наносять флуоресцентну речовину $[(\text{Gd}_{0,99}\text{Eu}_{0,01})_2\text{O}_2\text{S}]$. Флуоресцентне випромінювання, що виникає під дією ультрафіолетових променів, які проводяться оптичним волокном, приймаються цим же волокном. Для спектральних складових флуоресцентного випромінювання характерна зміненість по кривій β (при $\lambda=510$ нм), тобто сильна залежність від температури, і по кривій α (при $\lambda=630$ нм), тобто слабка залежність від температури, а температурний сигнал визначається шляхом обчислення співвідношення відповідних значень інтенсивності $\frac{\beta}{\alpha}$ (метод двох довжин хвиль). Область вимірювання таким сенсором температури від -50°C до $+200^\circ\text{C}$ з похибкою

$\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ і часом відгуку не більш 1 с.

1.2.1.3 ВОС на основі поглинання світла напівпровідником

Напівпровідник має граничну довжину хвилі λ_k спектра оптичного поглинання, і для світла з більш короткою довжиною хвилі, ніж λ_k , поглинання підсилюється, причому по мірі росту температури гранична довжина хвилі λ_k зміщується в сторону більш довгих хвиль (приблизно 0,3 нм/К). Якщо напівпровідниковий кристал зажати між приймальним і передаючим оптичними волокнами і подати на нього промінь від джерела світла, що має спектр випромінювання у межах вказаної границі спектра поглинання, то інтенсивність світла при проходженні через світлочутливу частину сенсора – напівпровідник – з підвищенням температури зменшується. Таким чином, по вихідному сигналу детектора можна виміряти температуру. Для зниження похибки вимірювання, обумовленою втратами в волоконно-оптичному тракті, дією впливаючих факторів, до яких чутливий ВОС, можна скористатись двоохвильовим методом.

Для вимірювання температури найчастіше використовують напівпровідникові матеріали зі структурою алмазу або сфалериту, які змінюють коефіцієнт поглинання з температурою за рахунок зміни ширини забороненої зони (α -Si, SiO₂, GaAs, GaN).

Термічне розширення кристалів із структурою алмазу і сфалериту при нагріванні означає, що збільшується середня відстань між атомами, а це у свою чергу призводить до зменшення ширини забороненої зони. При $180\text{K} < T < 350\text{K}$ (для кремнію) залежність $E_g(T)$ стає лінійною. Відносно $T = 300\text{K}$ цю закономірність, можна записати таким чином:

$$E_g(T) = E_g(300) + \gamma (T - 300), \quad (6)$$

де $\gamma = -\frac{dE_g}{dT}$ – температурний коефіцієнт $E_g(T)$.

Значення зміни ширини забороненої зони, краю внутрішнього поглинання та γ для деяких напівпровідників наведені у таблиці.

Параметр	InSb	Ge	Si	GaAs	PbS	PbTe
$E_g(0)$, еВ	0,23	0,74	1,17	1,52	0,286	0,19
$\lambda_k(0)$, мкм	5.39	1.68	1.06	0.82	4.34	6.53
$E_g(300)$, еВ	0,17	0,66	1,12	1,42	0,41	0,31
$\lambda_k(300)$, мкм	7.30	1.88	1.11	0.87	3.03	4.00
γ , еВ/град	$-2,9 \cdot 10^{-4}$	$-3,9 \cdot 10^{-4}$	$-2,4 \cdot 10^{-4}$	$-4,3 \cdot 10^{-4}$	$\approx +4 \cdot 10^{-4}$	$\approx +4 \cdot 10^{-4}$

Загальний вигляд спектральної залежності коефіцієнта поглинання α представлено на рис. 4.

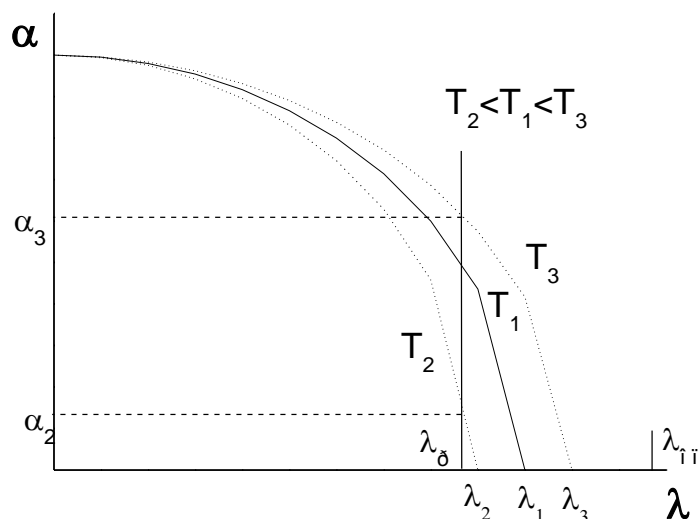


Рис. 4 Спектр поглинання напівпровідника в залежності від температури.

Для підвищення точності в сенсорі використовують двоохвильовий метод. Робочу довжину хвилі λ_p обирають поблизу краю внутрішнього поглинання напівпровідника в заданому діапазоні температур задля забезпечення максимальної зміни коефіцієнту поглинання α . Опорну довжину хвилі вибирають в діапазоні довжин хвиль, які не поглинаються напівпровідником.

Використовуючи в ВОС багатомодове оптоволокну з тефлоновою оболонкою, в якості термочутливого матеріалу – GaAs, джерела робочого оптичного сигналу – AlGaAs-світлодіод ($\lambda_1 = 0,87$ мкм), джерела опорного світла – InGaAsP-світлодіод ($\lambda_2 = 1,3$ мкм), можна виміряти температуру в інтервалі $30 \dots 300^\circ\text{C}$ з похибкою $\pm 0.5^\circ\text{C}$ і часом відгуку близько 2 с.

Подібний датчик знайшов практичне застосування для виміру температури дротів лінії електропередачі і температури обмотки високовольтного трансформатора.

2. Порядок виконання лабораторної роботи

2.1. Порядок виконання вимірювань

1. Зібрати дослідну установку (рис. 5.)

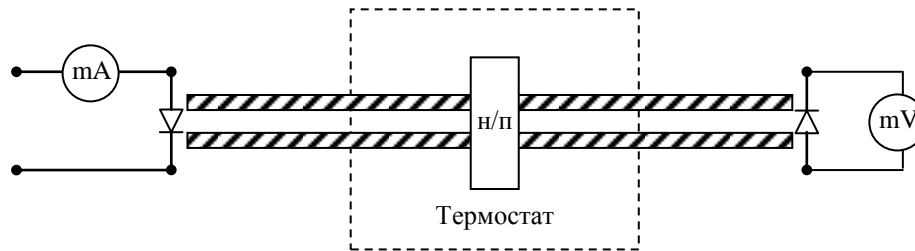


Рис. 5 Блок-схема дослідження оптоволоконного сенсора температури.

2. Зняти передаточну характеристику (залежність фотоЕРС від струму світлодіода) в діапазоні 0...100мкА з кроком 10мкА при відсутності оптичного середовища.
3. Встановити напівпровідникову пластину в розрив між оптичними волокнами, перевірити правильність її встановлення (за значенням фотоЕРС). Повторити п. 2. з оптично чутливим середовищем.
4. Встановити струм світлодіода на рівні 100 мкА (задається викладачем).
5. Зняти температурну залежність фотоЕРС в діапазоні 20°C - 80°C з кроком 5°C.

2.2 Обробка результатів

1. Побудувати передаточні характеристики волоконно-оптичного сенсора з оптичним середовищем та без нього (залежності фотоЕРС від струму світлодіода).
2. Побудувати залежності вихідного сигналу (фотоЕРС) від температури при постійному значенні світлового потоку.
3. Обчислити чутливість ВОС на лінійній ділянці передаточної характеристики (з оптичним середовищем) за формулою:

$$\gamma = \frac{U_2 - U_1}{U_1(T_2 - T_1)}$$

4. Написати висновки по роботі.

2.3 Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Схема вимірювання.
3. Порядок виконання роботи.
4. Експериментальні результати в табличному та графічному вигляді.
5. Результати обробки експерименту.
6. Висновки.

Список літератури

1. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник. – М.: Техносфера, 2005. – 588 с.
2. Аш Ж. Датчики в измерительных системах. Т.1, 2. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 564 с.
3. Росадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника. – М.: Высш. шк., 1991. – 351 с.
4. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. – М. Мир, 1984.
5. Носов Ю.Р. Оптоэлектроника. – М.: Радио и связь, 1989. – 359 с.
6. Окоси Т., Окамото К., Волоконно-оптические датчики. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 255с.
7. Бусурин В.И., Носов Ю.Р. Волоконно-оптические датчики: физические основы, вопросы расчета и применения. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 252 с.
8. Ермаков О.Н. Прикладная оптоэлектроника.- М.: Техносфера, 2004.- 414 с.